

# 运载火箭箭体制造关键装备与技术现状及发展

刘冬

(上海交通大学科学技术发展研究院, 上海 200240)

**摘要:** 运载火箭是一个国家进入空间的主要手段,其制造水平对控制空间的进程至关重要。箭体结构作为运载火箭的主体部分,是火箭制造中的关键。经过几十年的发展,箭体制造技术逐渐从以手工操作为主的模式转向绿色化、自动化技术为主的模式。根据国内外运载火箭箭体结构制造情况,对箭体结构制造流程中的关键技术及其装备进行了详细的介绍,包括板材成型、铣削加工、钻铆、焊接和箭体对接这5个主要流程,总结了相关技术的国内外差距以及应用难点,为我国运载火箭箭体结构制造水平的发展提供参考。

**关键词:** 火箭; 制造; 自动化

**中图分类号:** TH165      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.03.011

## Current situation and development of key equipment and technology of new generation launch vehicle body system

LIU Dong

(Institute of Science and Technology Development, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, CHN)

**Abstract:** Launch vehicles are the main means for a country to enter space, and its manufacturing level is crucial to the process of controlling space. As the main part of the launch vehicle, the structure of the rocket body is the key to rocket manufacturing. After decades of development, the rocket body manufacturing technology has gradually shifted from a manual operation-based model to a green and automated technology-based model. According to the manufacturing situation of the rocket body structure at home and abroad, this article gives a detailed introduction to the key technologies and equipment in the rocket body structure manufacturing process, including sheet metal forming, milling processing, drilling and riveting, welding and rocket body docking. The main process summarizes the domestic and foreign gaps and application difficulties of related technologies, and provides a reference for the development of my country's launch vehicle rocket body structure manufacturing level.

**Keywords:** rocket; manufacturing; automation

运载火箭是一个国家进入空间的主要手段,其制造水平对控制空间的进程至关重要。我国把发展航天事业作为国家整体发展战略的重要组成部分,《中国制造2025》中指出我国将“发展新一代运载火箭、重型运载器,提升进入空间能力”。为满足空间站工程、载人航天和月球探测等航天工程需求,需要开展“无毒、无污染、低成本、高可靠、适应性强以及安全性好”的新一代运载火箭研制,按照我国航天工业2030年发展规划要求,从“十三五”至2030年期间我国宇航产品将迎来高密度并行研制、多型号密集发射和应急发射的高峰期,这对提

升运载火箭的制造水平提出了迫切的需求<sup>[1]</sup>,

箭体结构是运载火箭最为关键的结构部件,也是火箭制造中的关键<sup>[2]</sup>,如图1所示,箭体结构主要由推进剂贮箱、铆接舱段等部分构成。推进剂贮箱作为运载火箭的主承力结构,是一种大尺寸、薄壁高强铝合金焊接结构,具有大尺寸、轻质、薄壁和复杂等典型特征。目前,运载火箭主体结构生产的全工艺主要流程如图2所示,主要包括了板材成型、铣削加工、钻铆、焊接和箭体对接5个主要部分,在过去几十年的发展过程中,这些流程中的制造技术逐渐从以手工操作为主的模式转向绿色化、自动

化技术与装备为主的模式，极大地提升了运载火箭的生产效率与可靠性。本文将重点介绍各流程制造过程中的关键装备与技术的发展历程与最新发展趋势，分析相关技术上的国内外差距以及研究难点，为我国运载火箭箭体结构制造水平的发展提供参考。

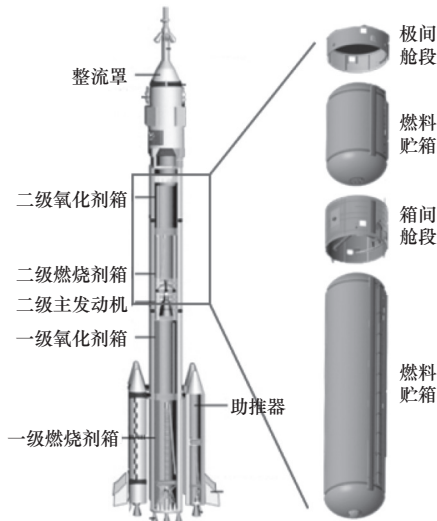


图1 运载火箭箭体组成结构

## 1 板材成形装备与技术

板材成形是运载火箭制造的起始环节。板材可以分为壁板类板材，如贮箱筒段壁板，以及箱底类板材，如瓜瓣。首先介绍箱底与筒段成形技术，最后介绍贮箱3D打印技术的应用前景。

### 1.1 箱底成形技术与装备

箱底零件其板材成形技术的发展主要经历了两个阶段：（1）零件拼接成形制造阶段。（2）整体成形制造阶段。

在运载火箭的发展初期，由于铝合金板材成形技术的限制，无法实现大尺寸箱底的整体制造，通常采用“分片制造+拼焊成型”的技术路线。箱底通常由瓜瓣、顶盖、法兰组成<sup>[2]</sup>，如图3所示。顶盖通常采用带压边的拉伸成形工艺。法兰通过锻造+机加工的工艺。瓜瓣作为箱底最主要的部件，其制造难度最大，通常使用弯曲成形工艺制造。在欧盟 Ariane5 火箭贮箱、俄罗斯火箭贮箱以及我国长征系列火箭贮箱箱底中采用了双向拉伸成形工艺制作。此外瓜瓣零件也有采用充液拉深成形技术制造，充液成形技术利用柔性介质作为施加压力的载体来成形板材，表面质量和均匀度也得到提高。箱底的“分片制造+拼焊成型”加工工艺，结构强度弱，具有厚重的承力焊缝，零件废重高。

随着铝合金成形工艺的发展，贮箱箱底的整体制造工艺逐渐发展成熟<sup>[3]</sup>。相比与拼接制造，整体箱底的制造工艺简化，可靠性提高。整体箱底成形包括整体旋压成形工艺和充液拉深成形工艺，如图4、图5所示。整体旋压成形工艺包括板材成形与后热处理。在成形阶段，通过旋转轮在一定轨迹下旋压转动的坯料实现零件成形。其优点是可以实现近似等厚成形，且公差小、加工成本低。缺点是在旋压过程中产生残余弯曲应力，需要采用后热处理。整体旋压成形工艺在美国 Atlas 系列和 Delta 系列火箭、日本 H-2 系列火箭以及欧盟 Ariane 5 火箭中得到应用。

充液拉深工艺由于采用液体介质，具有润滑和摩擦保持的效果，零件表面完整度较好，无划伤。并且可以一次拉深成形，无需多次热处理，工艺简单、可靠性高。充液拉深工艺在日本 H-2 重型火箭

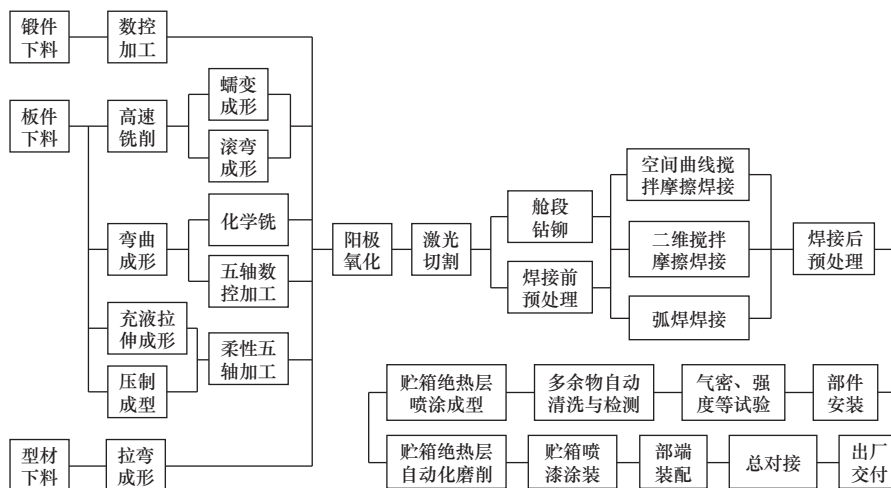


图2 运载火箭主体结构生产全工艺流程

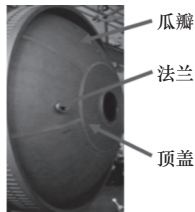
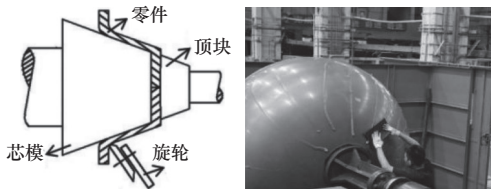
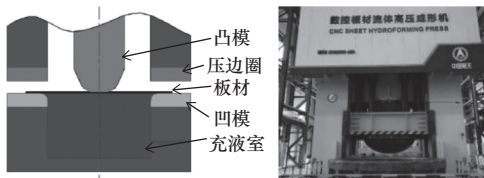


图3 箱底结构示意图

图4 旋压工艺与装备<sup>[1]</sup>图5 充液拉深工艺与装备<sup>[1]</sup>

4 m 贮箱、Ariane 5 火箭直径 5.4 m 贮箱中得到应用<sup>[4]</sup>。

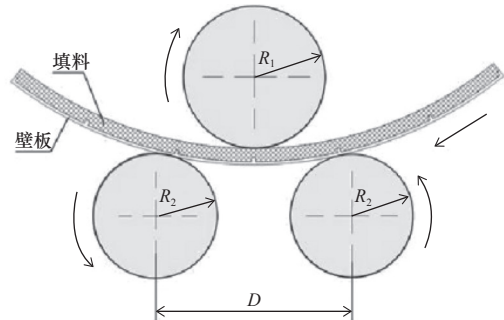
与国外相比，我国在箱底整体成形技术方面的差距还较大。国内已具有直径 2 250 mm 及以下尺寸的贮箱箱底整体旋压制造能力。对于 3 350 mm 箱底，航天科技八院 149 厂采用充液拉深成形工艺、一院 211 厂及七院 7 102 厂采用旋压工艺分别实现了箱底整体成形。但对于直径更大的箱底，还需要开展攻关研制<sup>[5]</sup>。

## 1.2 筒段成形技术与装备

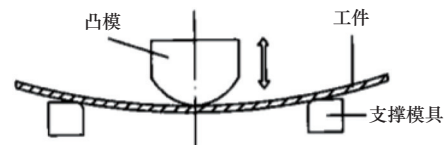
贮箱筒段或短壳由 3~4 块弧形壁板通过纵缝焊接形成<sup>[6]</sup>，壁板采用的成形工艺主要有滚弯成形、压弯成形、拉弯成形、喷丸成形、爆炸成形和蠕变成形等，其中以滚弯成形和等距压弯成形较为常见。

滚弯成形的原理是让板材通过 2~4 个辊轮，逐渐产生塑性形变，使得板材获得所需要的弧度，如图 6 所示。滚弯成形板材成形最早使用的工艺，其优点是简单灵活，生产效率高。滚弯成形的设备为卷板机，可以通过调整工作辊的形状、旋转运动和相对位置，加工出弧形件、筒形件等。从辊数上分类，目前较为常见的是三辊卷板机和四辊卷板机，从传动方式上则可分为机械式和液压式。受制于国内液压马达和行星减速器等基础件的研发水平，目前我国的卷板机制造主要还集中在中低档位，

在卷制精度、质量控制和配套产线开发等方面有待提高<sup>[7]</sup>。

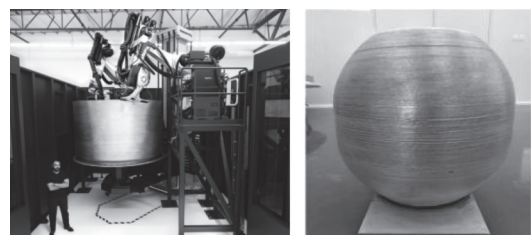
图6 滚弯成形示意图<sup>[7]</sup>

压弯成形的原理是利用机械装备将板材弯曲成一定角度和曲率，如图 7 所示。整体壁板在压弯成形主要经历弹性、弹塑性、塑性变形和回弹 4 个阶段，成形发生在塑性变形阶段，而回弹阶段则会降低板材的加工精度。运载火箭壁板最早采用的是增量压弯成形，其适合于成形厚度较大、变截面等外形较复杂的整体壁板。与滚弯成形相比较，压弯成形是一种不连续的局部三支点弯曲。其优点是装备简单，生产成本较低；缺点是残余应力较大，且劳动强度大，难以实现自动化。

图7 压弯成形示意图<sup>[7]</sup>

## 1.3 贮箱 3D 打印技术

目前，3D 打印也开始引入到了贮箱的制造中来，其主要的优势是可以降低制造的时间周期和成本，特别是对于结构复杂的飞行器贮箱。Relativity Space 创建了名为 Stargate 的大型零件 3D 打印系统<sup>[8]</sup>，如图 8a 示，该系统基于选择性激光烧结工艺。目前，Terran 1 和 Terran R 的第一、二级和整流罩通



(a) Relativity Space 大型零件 3D 打印系统

(b) 火箭院 3D 打印贮箱

图8 贮箱 3D 打印技术



过 3D 打印完成，其中 Terran 1 将于 2023 年初发射。国内，火箭院与西安交通大学联合研究用 3D 打印技术制造火箭贮箱，图 8b 为测试打印的火箭贮箱件。

目前 3D 打印贮箱的主要问题是高强铝合金在 3D 打印熔化、凝固过程中极易产生气孔、内裂纹等问题<sup>[9]</sup>。而贮箱里要装满液体推进剂，必须具有良好的致密性。因此研发适合 3D 打印的高强铝合金粉末是需要解决的技术难题。John H M 等人研发了一种基于纳米成核剂实现 3D 打印铝合金的技术<sup>[10]</sup>，该技术适合一系列合金材料，具有一定的普适性。因此火箭贮箱 3D 打印未来有望得到更大应用。

## 2 铣削加工装备与技术

组成贮箱和舱段的板材在成形后，尺寸和壁厚精度无法满足设计要求，需要进一步通过铣削加工使成形后的毛坯件满足后续焊接、装配需求；另一方面通过铣削加工可以在保证结构强度不变的情况下，大幅减少箭体的重量，对提升运载火箭的运载能力至关重要。于是，为了平衡贮箱承载能力和结构强度，对火箭箭体结构的壁厚误差需要严格控制。因此，以控制壁厚为目标的“极端”弱刚性结构件的高效精密减薄加工技术是火箭箭体制造的关键技术。

在箭体结构铣削加工中，弱刚性薄壁件占火箭覆盖面积约 60%。这类弱刚性零件的铣削加工工艺发展经历了从化铣，靠模加工，平板铣后压型，到镜像铣削的历程，如图 9 所示。化铣是传统制造工艺，相比于后续发展的机械铣削具有高污染、低精度以及多缺陷的弊端。靠模加工通过靠模贴合大型薄壁件从而提高系统刚性，但存在胎模与箱底贴合率低的问题，导致振纹显著，且部分区域无法均匀加工，壁厚超差严重，加工质量无法满足设计要求。平板铣后压型容易出现开裂、凸楞及适用性差。镜像铣削是机械加工火箭箭体高效、精确及绿色的新一代技术<sup>[11]</sup>。在铣削过程中，通过加入支撑装置，使铣削端和支撑装置沿工件两侧镜像对称移动，依靠随动支撑改善薄壁件加工区域的局部动态特性。在支撑装置中加入实时测量壁厚传感器，根据壁厚数据实时调整切削深度，实现加工过程中剩余壁厚的精确控制。镜像铣削技术摆脱了火箭箭体加工对工装的依赖，一次装夹即可完成减薄、开孔、切边等多道工序，经验证其加工时间和成本均降低 50%，显著提高了大型薄壁件的加工效率。此外，镜像铣

削工艺能耗低、无污染，是火箭箭体加工的最新技术和发展趋势<sup>[12]</sup>。

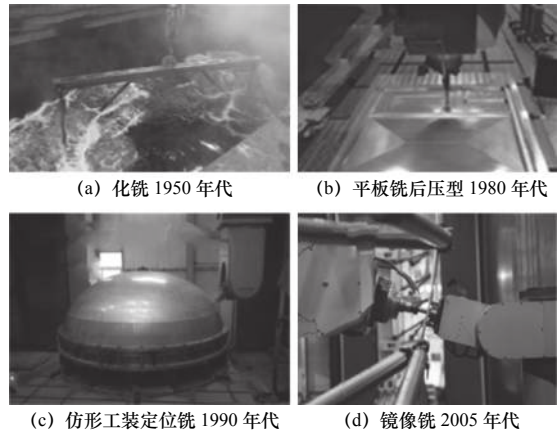


图 9 火箭箭体铣削装备发展史

经法国空客和西班牙 M.Torres 验证，在大型薄壁件加工中可以实现壁厚精度达到 $\pm 0.1$  mm。针对火箭箭体贮箱箱底的加工，上海交通大学与天津航天长征火箭制造有限公司、上海航天设备制造总厂有限公司合作开发了整体箱底双五轴镜像铣削装备，如图 10a 所示。使用 3 350 mm 级航天蒙皮镜像铣削装备加工运载火箭贮箱箱底管板瓜瓣蒙皮，通过镜像铣削来控制加工精度，壁厚加工精度由 $\pm 0.5$  mm 提高到了 $\pm 0.1$  mm。针对火箭贮箱筒段的加工，上海拓璞数控科技股份有限公司研制了整体筒段镜像铣削装备，如图 10b 所示，对于 3 350 mm 贮箱筒段，实现了壁厚精度控制，壁厚精度达到了 $\pm 0.1$  mm 的要求。在镜像铣削过程中，为保证工件的壁厚精度，铣削侧刀具切深会根据工件实际厚度实时改变，时变的切削厚度会产生时变的激励。因此镜像铣削面临恒定参数随动支撑被动抑振难以适应时变激励下时变动态特性工件加工的难题。在火箭箭体在铣削

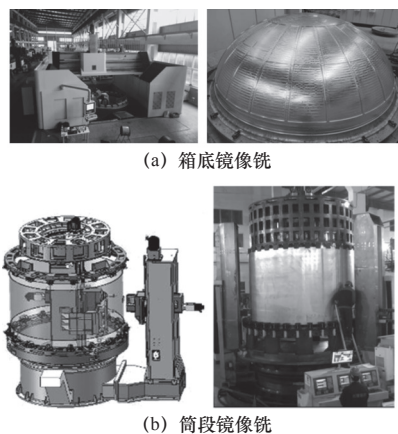


图 10 火箭箭体镜像铣削技术

过程中会出现工件切削振动、壁厚随机超差和曲面板整体变形等问题,难以实现高质效加工,因此将镜像铣削技术应用于火箭箭体的制造仍面临诸多技术挑战。

火箭箭体由于刚性弱在铣削加工中处于不稳定状态,极易发生颤振,加工振动影响壁厚精度,导致工件与刀具、工件与支撑的短暂脱离,影响火箭箭体铣削质量。传统加工中的振动以刀具的颤振为主,而在薄壁件加工中工件刚性远远弱于刀具,刀具可以看成刚体,此时影响加工的是薄壁件的振动,需要建立适用于薄壁件加工的稳定动力学模型,反映“刀具-薄壁件”之间的复杂交互作用<sup>[13]</sup>,这是进行加工振动稳定性分析以及实现无颤振加工的基础。由于在加工中存在材料的去除作用,薄壁件的动力学具有随位置和时间改变的特点,会有短时失稳的现象发生,利用非正交动力学分析的方法可以预测加工中的短时失稳,对短时失稳进行有效的控制。在此基础上,目前的方法集中于“离线判稳+加工参数修正”以及采用支撑被动抑振抑振,难以适应时变位变的实际加工状况。通过主动调节支撑参数改变系统的动力学特性,从而实现全状态下薄壁件稳定铣削是未来稳定性控制的研究方向。

尺寸大、刚性弱和壁厚精度要求高是火箭箭体零件的重要特征,毛坯件变形和切削力变形等诱导工件实际形状与理论形状的差异远大于加工精度,因此变形成为壁厚精度控制的主要难题。利用激光扫描系统对毛坯工件外形进行扫描检测<sup>[14]</sup>,得到毛坯外表面的点云数据,通过数据处理得到变形曲面与设计曲面之间的映射关系,以映射关系为约束条件,调整加工刀轨。

目前的火箭箭体铣削支撑装置采用固体支撑,当装置与壁面产生相对运动时,会产生划伤和压痕,导致工件表面质量无法满足要求,采用射流支撑能有效解决这个问题。然而目前缺乏射流抑制振动的动力学特性、“射流-弱刚性零件”流固耦合作用的理论研究。此外,目前研究中未考虑极端弱刚性零件加工中工件局部法向变化和大弹性变形,亟待进一步深入研究双五轴运动系统的实时协同控制理论与变形曲面匹配及加工轨迹逐点调控方法。

### 3 自动钻铆装备与技术

运载火箭筒体壳段是火箭的重要承载部分,如图 11 所示,主要由端框、中间框、桁条和蒙皮等

组成,属于大型复杂薄壁类零件,它的特点在于高曲率、壁厚小、刚性差和结构复杂等<sup>[15]</sup>。这些特点导致运载火箭筒体壳段在装配时工艺复杂、定位和装配困难,目前零件间连接 90% 以上采用铆接工艺完成<sup>[16]</sup>。在传统的运载火箭筒体壳段生产过程中,调整、定位装卡、扩孔以及铆接这些流程都需要人力来完成,造成运载火箭筒体壳段装配劳动强度大、生产效率低、装配精度差以及质量不稳定的问题。根据统计新一代运载火箭五米舱段铆钉数量高达 16 万余颗<sup>[17]</sup>,依靠传统手工的铆接方法愈发难以满足运载火箭大型舱段的高可靠、快速制造需求。

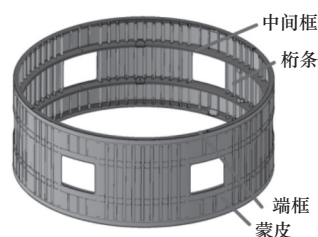


图 11 运载火箭筒体壳段结构示意图

采用自动钻铆技术实现的制孔和铆接是提高运载火箭筒体壳段装配质量与效率的有效途径,相比于手工钻铆,自动钻铆效率能提高 5 倍;精度能够提高 10 倍。国外以美国捷姆科、EI、德国宝捷和意大利 B&C 为代表的自动钻铆装备已经广泛应用在航空航天各个领域<sup>[18]</sup>。欧洲的阿里安 6 火箭的级间筒段为桁架、框、蒙皮结构组装,在德国奥格斯堡工厂的筒段装配中应用机器人钻孔和铆接技术,实现更高效、更廉价的生产过程<sup>[19]</sup>,如图 12 所示。

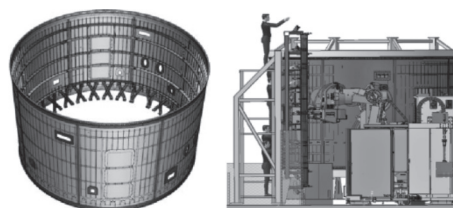


图 12 阿里安 6 号级间筒段装配示意图

我国对于自动钻铆技术的研究和应用越来越重视,近年来首都航天机械公司、天津航天长征火箭制造有限公司、上海交通大学以及北京航空制造工程研究所等针对自动钻铆系统开展技术研究,为自动钻铆技术在运载火箭制造中的应用奠定基础。上海拓璞数控科技有限公司针对某大直径运载火箭一二级级间筒段研究了自动钻铆设备,如图 13 所示,该设备系统主要由数控柔性定位系统、铆接机械手、



行星钻顶机构、自动送钉系统、控制系统、直线和回转运动机构等6部分组成，通过工艺研究与产品的试制，自动钻铆装配能够提高制孔及铆接效率6倍以上<sup>[20]</sup>。

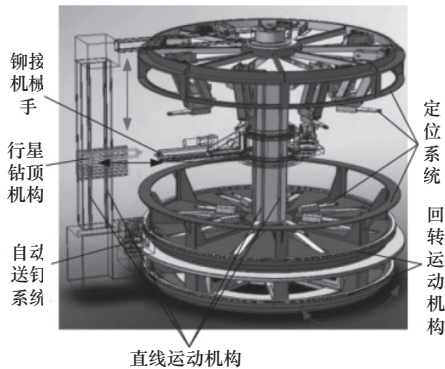


图 13 国内上海拓璞数控科技有限公司自动钻铆设备

为实现运载火箭钻铆舱段自动钻铆装配，自动钻铆技术集检测、制孔和铆接等多种技术于一体，涉及高精度定位技术、制孔质量控制与在线检测技术、通用式自动钻铆机器人技术与离线编程与仿真技术等关键技术。高精度定位针对自动钻铆工艺中桁条、框的定位精度直接影响自动钻铆过程自动制孔位置尺寸精度的问题，由于筒段壳段装配存在误差，工件在机床坐标系中的位置与离线编程所建立的模型之间存在一定的偏离，需采用工件视觉自动定位技术来精确定位工件在钻铆系统中的位置；制孔质量控制与在线检测方面，制孔质量对装配质量有重要影响，通过开展制孔工艺研究，优选钻削工艺参数，可以获得毛刺控制工艺参数，具体可选择刀具材质、刀具钻尖顶角、主轴转速、进给量和夹紧力5个参数进行正交工艺试验；通用式自动钻铆机器人方面，机床式自动钻铆设备加工精度与制孔及铆接质量与机器人自动钻铆相比有优势，但在设备灵活性、适应性上差于机器人自动钻铆，并且机床式自动钻铆设备结构复杂、规模庞大和投资成本高，往往是以专机形式进行研发投产；机器人自动钻铆设备由工业机器人系统与工装系统组成，加工精度满足运载火箭铆接舱段要求，借助机器人的高自由度与合理的工装设计，可大大提升自动钻铆系统的通用性；离线编程与仿真一般包括孔位及紧固件类型信息提取、数控自动编程、刀位文件生成和离线仿真等模块。自动钻铆数控程序是以设计文件为输入生成的指令文件，数控程序运用到产品生产之前，需要经过严格的可视化仿真，验证产品定位

方式的合理性、程序及工艺流程的可行性、可靠性，形成正确的工艺文件<sup>[21]</sup>。

运载火箭铆接舱段将逐步全部采用自动钻铆技术，进一步提升运载火箭舱段制造自动化，提高产品质量一致性。未来，针对上述自动钻铆的各关键技术，值得广泛开展视觉识别等先进检测技术与设备的集成应用，提升设备的智能化水平。发展面向数字化装配的结构设计，开展工艺设计的一体化协同工作。深入开展产品标准化工作，提高工艺信息和工艺方法的可继承性。

#### 4 焊接装备与技术

贮箱筒段或短壳由3~4块弧形壁板纵缝焊接形成，其制造路线主要有“滚弯成形—化学铣削—TIG熔焊”和“高速数控铣削—等距压弯成形—搅拌摩擦焊”两种<sup>[22]</sup>。2007年以前，我国的长征系列火箭大多采用第一种方法，其制造质量相对较差，且会造成较大的环境污染问题。随着搅拌摩擦焊等各项技术的不断成熟，目前我国和世界其他国家均采用第二种方法实现贮箱制造。火箭燃料贮箱生产过程中的焊接工艺流程如图14所示。其中箱底短壳的纵缝焊、箱底组合件的过渡环环缝焊接、顶盖环缝焊接、短壳锁底焊接、顶盖法兰等焊接、箱体筒段的纵缝焊、火箭燃料贮箱的箱底与筒段环缝焊接、筒段与筒段环缝焊接、筒段与箱底封箱焊接都需要对应的搅拌摩擦焊设备。

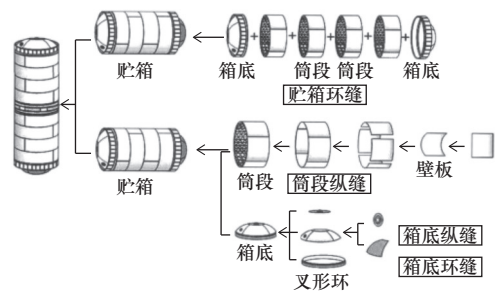


图 14 运载火箭贮箱主体结构及主焊缝

搅拌摩擦焊接（FSW）是英国焊接研究所于1991年发明的焊接技术，利用一种特殊形式的搅拌头边旋转边前进，通过搅拌头与工件的摩擦产生热量，使金属处于热塑性状态，并在搅拌头的压力作用下从其前端向后部塑性流动，从而使待焊工件连接为一个整体<sup>[23]</sup>。搅拌摩擦焊接过程如图15所示。在焊接质量上，搅拌摩擦焊接作为取代传统熔化焊接的新一代焊接技术，焊接接头强度平均提升

10%~20%，通过先进装备的控制一次性合格率达到90%，无弧光、辐射等污染。在焊接效率上，传统熔焊技术需开坡口、填充焊丝并经多道焊完成焊缝成形，而搅拌摩擦焊接技术无需填充焊材，能够一次完成焊缝成形；搅拌摩擦焊缝在剃除“飞边”后，表面无需修整，焊缝基本无缺陷，因此搅拌摩擦焊接技术在效率方面更有优势<sup>[24]</sup>。

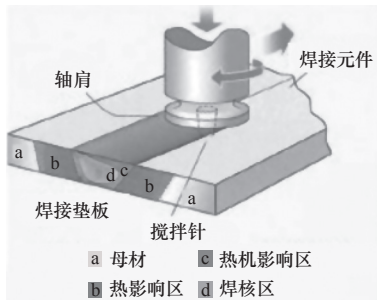


图 15 搅拌摩擦焊接过程<sup>[24]</sup>

世界航天强国在运载火箭贮箱生产中均广泛采用了搅拌摩擦焊接技术，研制了成套焊接装备，在提高可靠性的同时，有效降低了制造成本。美国洛马公司在航天飞机外贮箱的焊接生产中对搅拌摩擦焊接进行了成功应用。美国国家航空航天局（NASA）针对登陆火星研制的太空发射系统（SLS）采用直径8.4 m贮箱，为了提高运载火箭发射的可靠性，贮箱全部采用搅拌摩擦焊接技术，在2014年研制了迄今为止全世界最大的搅拌摩擦焊接装备。图16为美国国家航空航天局箱底搅拌摩擦焊接生产线。

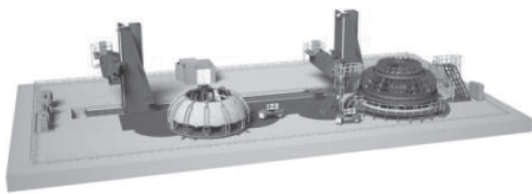


图 16 美国国家航空航天局箱底搅拌摩擦焊接生产线

国内上海拓璞数控科技股份有限公司研制了箱体筒段、箱底多任务焊接任务需求的国产化设备，如图17所示。



图 17 上海拓璞数控科技股份有限公司研制的筒段、箱底搅拌摩擦焊设备

在搅拌摩擦焊未来主要发展方向是焊接工艺与质量理论，其中焊接工艺对焊接产品质量有着巨大的影响。焊缝间距、焊接速度、搅拌头旋转速度和下压量等众多工艺参数都影响着搅拌摩擦焊接头力学性能。目前通常采用设计正交实验的方法确定最优焊接参数，工作量大，生产效率低。研究工艺参数对焊接成品质量的理论模型，对优化工艺参数、增大加工效率有着积极意义<sup>[25]</sup>。还需要研究焊接过程数值仿真，目前的焊接工艺开发工作耗时太长，需要进行许多实验来确定不同工具、合金、厚度或接头配置的工艺参数。如果数值仿真模型能够准确预测搅拌区和周围材料中的温度和材料流动，以及由此产生的接头特性，可以显著缩短确定最优工艺参数的时间<sup>[26]</sup>。

## 5 箭体对接装备与技术

箭体级段对接装配是运载火箭总装中的重要环节。火箭箱间段与氧化剂箱、级间段与燃料箱、尾端与过渡段等箭体分段都需要通过对接装配工序完成箭体总装。箭体对接装配方式也可分为水平对接和垂直对接。传统箭体对接方式都为手工操作，对接过程中需要装配人员前后跑动，主要依靠人眼和经验判断舱段间相对位置，并转动手轮调整舱段位姿，需要经过反复多次的调节试错才能完成，对接效率与精度都很低。随着技术的发展，自动对接装配系统在航空领域已经得到了广泛应用<sup>[27]</sup>，大大提高了飞机的装配效率和质量。自动对接装配系统一般由大尺寸测量系统、伺服调姿系统和控制系统构成。在航天领域，自动化对接装配系统的研究与应用还处于发展阶段，随着世界航天产业的蓬勃发展，火箭制造产业急需提升火箭总装的效率与质量。

### 5.1 定位测量装备与技术

为实现箭体舱段间的准确对接，需要测量得到两个舱段间精确的相对位置与姿态。针对飞机、火箭这类大尺寸设备测量场景，目前应用较为成熟的测量系统主要有激光跟踪仪、室内iGPS系统、旋转激光自动经纬仪系统以及摄影测量等方式。箭体筒段属于大型薄壁件，径厚比极大，在重力和外力作用下极易变形，使得两对接面的定位基准难以找正，成为箭体对接装配中的瓶颈问题<sup>[28]</sup>。在箭体对接装配过程中，一般可通过构建大尺寸空间测量系统，在对接箭体筒段的对接端面和外表面布置多个靶标点，测得箭体筒段上的一些特征点坐标（图18），



并通过几何面拟合、相对坐标变换等方式间接计算得到对接筒段的轴线、对接端面平面或对接销钉销孔的相对位置和姿态。随后可通过建立相应的筒段对接评价指标,求解当前位姿与最优位姿间的位姿变换,用于指导筒段的位姿调整<sup>[29]</sup>。

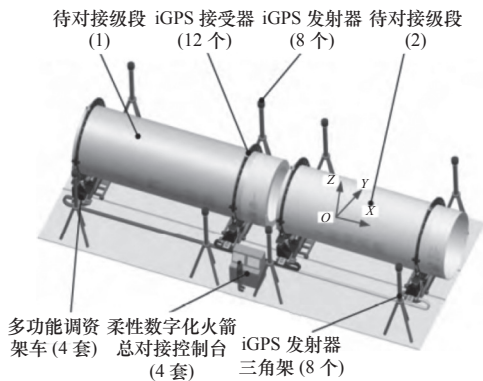


图 18 iGPS 系统在箭体对接中的应用<sup>[29]</sup>

### 5.2 对接调姿装备与技术

对接调姿装备是箭体空间 6 个自由度位姿调节的执行机构,同时也起到对箭体的承载支撑作用。箭体水平对接装配主要使用支撑架车实现对箭体的支撑和位姿调节。为实现对箭体空间 6 自由度的位姿调整,单个支撑架车至少需要具备四个自由度的运动功能,即沿 X、Y、Z 方向直线平动以及绕筒段轴线的回转运动,剩余两个空间旋转自由度的调节则通过前后两个架车的相对移动实现。传统支撑架车都采用人工驱动手轮方式进行调节,体力劳动量大。随着自动化技术的发展,采用伺服电机驱动的伺服调姿架车<sup>[30]</sup>可以大大降低装配工作的劳动强度,促进对接装配流程的全自动化。美国 NASA 在 SLS 火箭制造中使用的 Wheelift transporter 系统使用了重载 AGV 底盘,集自动运输功能和对接调姿功能于一体,进一步提升了箭体制造装配的效率。绳索牵引式并联机构<sup>[31]</sup>在火箭箭体对接装配领域的应用探索也得到了一些研究。图 19 所示为一种绳驱动并联式筒段对接调姿机构,对接时使用 6 根钢丝绳将箭体筒段吊离架车,并通过控制钢丝绳的长度实

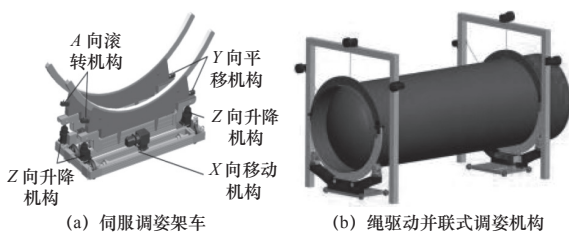


图 19 对接调姿装备

现对箭体的位姿调整。

### 5.3 自动对接装配技术

基于大尺寸空间测量系统与伺服调姿机构,可构建相应的闭环自动对接控制系统。文献 [32] 展示了一种基于激光跟踪仪测量系统和伺服调姿架车构成的火箭部端自动对接装配系统的工作流程。由测量系统实时测量筒段相对位姿信息,并解算得到向最佳对接状态调整的运动参数反馈至控制系统,驱动执行机构对筒段位姿进行相应调节,从而完成箭体自动化对接装配。

近年来,航天发射任务密集化对运载火箭制造产能提出了更大的需求,箭体对接技术的数字化、自动化是提升制造效率的重要手段。火箭型号的多样化以及未来重型运载火箭的需求,使得提升对接调姿设备的通用性、柔性化应用能力以及承载能力成为重要的发展方向。

## 6 结语

总结了新一代运载火箭箭体结构关键制造技术与装备的发展现状,主要包括了大型构件的板材成型、铣削加工、自动钻铆、搅拌摩擦焊接和箭体对接环节,并对各制造流程中的关键技术研究及应用状况进行了分析。

虽然箭体制造过程逐步实现了制造设备的单机自动化,并且国产装备的指标参数和可靠性得到了显著提升,正服务于航天型号产品的研制生产,但在整个制造环节中仍需通过人工干预、离线仿真与自动化设备的方式相结合,来保证当前运载火箭的高质量生产。国产装备在航天制造工艺适应性和柔性自动化等方面仍存在较大差距,需要开展国产柔性自动化装备的开发,以数字化物流、专家知识库、生产过程实时监控、工艺过程自适应控制、在线高精度检验和设备故障诊断等智能功能为建设内容,突破工艺自适应控制、制造质量控制、知识获取与应用等关键技术,提升火箭箭体产品质量一致性、增强制造系统柔性、提高制造效率。

### 参 考 文 献

[1] 孟光. 数控机床专项航天领域实施成效与展望[J]. 高档数控机床与基础制造装备, 2019(1).  
 [2] 姚君山, 蔡益飞, 李程刚. 运载火箭箭体结构制造技术发展与应用[J]. 航空制造技术, 2007(10): 36-40, 42.  
 [3] 周磊, 杨国平, 刘凤财, 等. 超大直径贮箱箱底整体旋压成形技术[J]. 锻压技术, 2021, 46(3): 151-157.  
 [4] 赵俊伟. 大吨位充液拉深成形控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨



- 工业大学, 2015.
- [5] 合肥合锻. 国际首次成形运载火箭大规格燃料贮箱薄壁整体箱底[J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53(6): 6.
- [6] 郝云飞, 王国庆, 周庆, 等. 运载火箭铝合金贮箱全搅拌摩擦焊接工艺及应用[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(6): 11-20.
- [7] 王国辉, 曾杜娟, 刘观日, 等. 中国下一代运载火箭结构技术发展方向与关键技术分析[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(5): 1-11.
- [8] Salmi B. 3D—printing a rocket: I'll never forget the first time I saw a rocket materialize before my eyes[J]. *IEEE Spectrum*, 2019, 56(11): 22-29.
- [9] Dudas J H. Preventing weld cracks in high strength aluminum alloys[J]. *Welding Journal*, 1966, 45(6): 241-249.
- [10] Martin J H, Yahata B D, Hundley J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. *Nature*, 2017, 549: 365-369.
- [11] Rubio A, Calleja L, Orive J, et al. Flexible machining system for an efficient skin machining[C]. SAE 2016 Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition.
- [12] 向兵飞, 黄晶, 许家明, 等. 蒙皮铣削镜像顶撑技术研究[J]. 制造技术与机床, 2015(4): 92-96.
- [13] Dong H Q, Ji Y L, Wang X Z, et al. Stability analysis of thin-walled parts end milling considering cutting depth regeneration effect[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(11-12): 1-10.
- [14] Bi Q Z, Huang N D, Zhang S K, et al. Adaptive machining for curved contour on deformed large skin based on on-machine measurement and isometric mapping[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 136: 34-44.
- [15] 梁莹, 李宇昊, 朱迅强, 等. 大型薄壁舱体的自动钻铆技术研究[J]. 航天制造技术, 2013, 10(5): 38-42.
- [16] 章茂云, 侯东旭, 孙立强, 等. 运载火箭筒体壳段自动钻铆技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2018, 54(5): 36-39.
- [17] 申林远, 曹宇, 刘东平, 等. 运载火箭舱段壁板自动钻铆技术应用研究[J]. 航天制造技术, 2018, 211(5): 25-28.
- [18] 喻龙, 章易镰, 王宇晗, 等. 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): 16-25.
- [19] Christopher Chaffardon. Tanks and structures for the new Ariane 6[C]. 69th International Astronautical Congress(IAC).
- [20] 叶顺坚, 梁莹, 石正波, 等. 自动钻铆技术在某运载火箭助推模块箱间段研制中的应用[J]. 上海航天, 2014, 31(S1): 15-19.
- [21] 王珉, 陈文亮, 郝鹏飞, 等. 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): 80-83.
- [22] 鲁宇. 中国运载火箭技术发展[J]. 宇航总体技术, 2017, 3(3): 5-12.
- [23] 柯黎明, 邢丽, 刘鹤平. 搅拌摩擦焊工艺及其应用[J]. *焊接技术*, 2000, 29(2): 7-8.
- [24] 相倩, 吕念春, 薛鹏, 等. 铝-钢异种金属搅拌摩擦焊研究现状及展望[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(20): 28-37.
- [25] Chen G Q, Ma Q X, Zhang S, et al. Computational fluid dynamics simulation of friction stir welding: A comparative study on different frictional boundary conditions[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(1): 128-134.
- [26] Aziz S B, Dewan M W D, Huggett D J, et al. A fully coupled thermomechanical model of friction stir welding(FSW) and numerical studies on process parameters of lightweight aluminum alloy joints[J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2018, 31(1): 1-18.
- [27] 王亮, 李东升, 张俐, 等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用[J]. *航空制造技术*, 2011(21): 72-75.
- [28] 李强, 张志博, 申定贤, 等. 新一代大型运载火箭总装数字化对接技术综述[J]. *科技与创新*, 2019(4): 100-101.
- [29] 王皓, 陈根良, 黄顺舟, 等. 面向最优匹配位置的大部件自动对接装配综合评价指标[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(23): 137-146.
- [30] 郭峰. 运载火箭多功能对接架车研究[J]. *电子机械工程*, 2020, 36(3): 53-56.
- [31] Yao R, Tang X Q, Wang J S, et al. Dimensional optimization design of the four-cable-driven parallel manipulator in FAST[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(6): 932-941.
- [32] 熊占兵, 马康, 毕海娟, 等. 大型运载火箭部段自动对接装备及工艺流程设计[J]. *导弹与航天运载技术*, 2021(5): 122-127.
- 第一作者/通信作者: 刘冬, 男, 1981年生, 副研究员, 上海交通大学先进技术与装备研究院副院长, 主要研究方向为火箭关键零件制造装备技术。E-mail: liudong1028@sjtu.edu.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2022-12-18)

文章编号: 20230313

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。