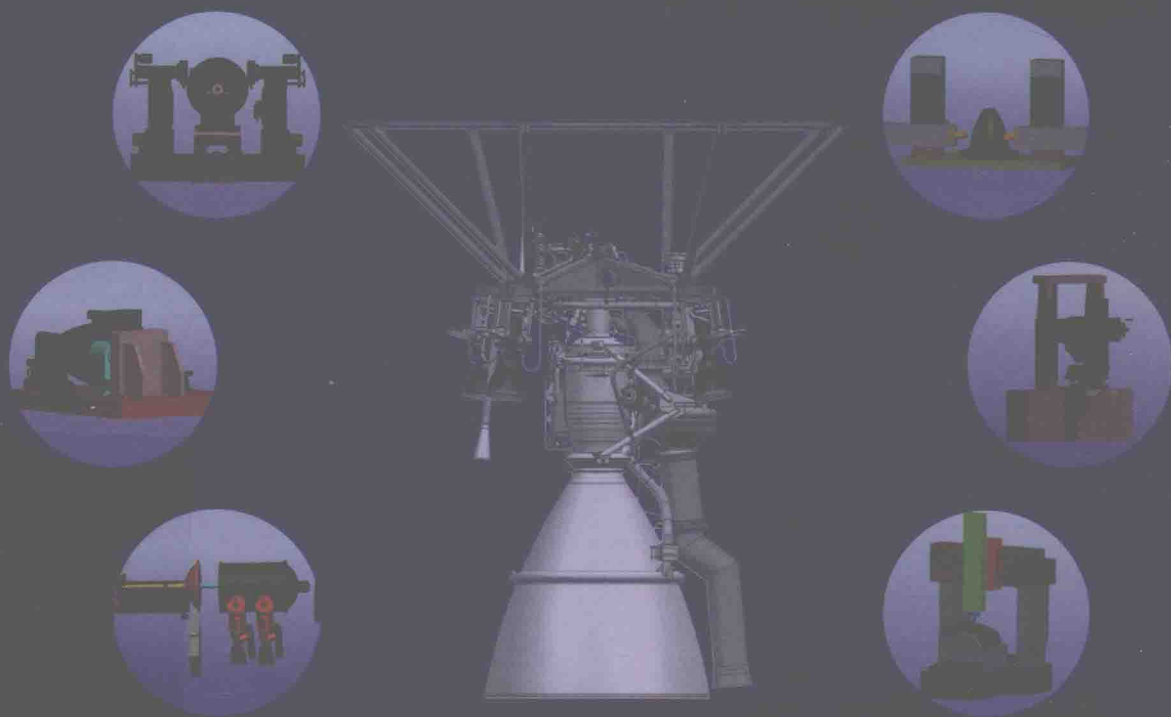




航天科技图书出版基金资助出版

# 常规液体火箭发动机 专用设备设计

马双民 主编



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

# 常规液体火箭发动机 专用设备设计

马双民 主编



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

常规液体火箭发动机专用设备设计 / 马双民主编

— 北京: 中国宇航出版社, 2018. 10

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1402 - 2

I. ①常… II. ①马… III. ①液体推进剂火箭发动机  
- 专用设备 - 设计 IV. ①V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 279032 号

责任编辑 彭晨光 装帧设计 宇星文化

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830  
(010)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888 (010)68371900  
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部  
(010)68371105

承印 河北画中国画印刷科技有限公司

版次 2018 年 10 月第 1 版  
2018 年 10 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 30.75

字数 749 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1402 - 2

定价 228.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 编写委员会

名誉主任 张贵田 谭永华

主 任 刘志让

主 编 马双民

副 主 编 郭宽峰 李护林

执行主编 董 飞

编 委 晁 阳 桑 立 许桐晔 施 琼 王 鹏

刘广续 郝贵新 赵海珠 高建平 李 华

刘祥斌 马 尧 王海龙 董亚星 郭 晟

李剑峰 千 登 程 鹤 何 亮

## 序

现代导航、国际通信、陆地与海洋研究、深空探测与开发利用，都需要建立在火箭、人造地球卫星和空间站技术的基础上。然而在把航天器送入预定轨道，并在保证其稳定可靠、定向可控和安全返回着陆等多项任务中，液体火箭发动机起着决定性的作用。

中国航天事业发展到今天，从无到有，从小到大，从弱到强，经历几多艰辛和磨难。依靠自力更生、艰苦创业、开拓进取，掌握和创造了特有的航天技术，令世界瞩目，常规液体火箭发动机的研制也不例外。50多年来，广大工程技术人员，针对液体火箭发动机设计要求和特点，为了研制可靠性高、技术水平先进的发动机，呕心沥血，毕生投入。在传统工艺基础上进行新的工艺技术研究，不断摸索、开发、拓展、提升、优化，提炼出了一套适应和保障航天液体火箭发动机研制的工艺技术，提高了液体火箭发动机制造水平，推动了航天技术的发展，为保障液体火箭发动机固有质量和工作可靠性提供了坚实的技术支撑。

至今，我国出版的航天液体火箭发动机设计与制造的专著较少，本书的出版发行，可对此领域有所裨益。书中重点论述了常规液体火箭发动机专用设备的设计思路和技术要点，并以采用大量实例的方式进行介绍，使得内容生动易懂，有些经验和数据是广大航天人多年辛勤耕耘、艰苦探索的结果和智慧的结晶。这是一本较为完整的常规液体火箭发动机专用设备设计的技术专著，具有较强的系统性、针对性、实用性和科学性。坚信《常规液体火箭发动机专用设备设计》一书，既是对以往航天发动机制造工艺装备技术领域的系统总结，也可使后辈新生力量站在更高的起点上展开工作。同时，也可供同行及相关人员学习和参考，使他们在工作中有所提高。



中国工程院院士

2017年12月

## 前 言

航天技术从诞生之日起，就成为引领全球科学技术发展的排头兵，航天技术的每一次突飞猛进的发展都是以航天运载工具技术的突破为标志，目前，我国已由航天制造大国向航天制造强国迅速转变，其中，航天运载工具制造领域中液体火箭发动机制造技术尤为引人瞩目。液体火箭发动机是运载火箭的心脏，它的主宰功能和高可靠性要求，使其结构复杂，工艺苛刻，采用的工艺和技术也相对较多。我国常规液体火箭发动机的研制和发展是我国液体火箭发动机的奠基石，它以传统制造工艺为基础，涉及铸造、锻造、钣金、焊接、热处理和表面处理等专业，也涉及电化学、电火花等特种工艺。在实现这一系列工艺到产品的制造过程中，工艺装备的设计与制造起到了不可替代的辅助和支撑作用。它贯穿于液体火箭发动机设计和制造过程的始终。如今，工艺装备的设计和制造能力已经成为衡量一个国家先进制造技术水平和能力的重要标志之一。

在常规液体火箭发动机长期的研制过程中，老一辈航天人积累了大量的理论和实践经验，涌现出了一批既有理论、又有实践经验的工程技术人员。航天人一向秉承“传、帮、带”的光荣传统，他们把丰富的实战经验从专业、理论及切合生产实际的角度，系统的以文字记载的方式进行固化，使之变成可读可学的专业理论传之于后辈，这将会更有利于指导航天新人的工作实践，让他们从书中得到更多的启迪。“长江后浪推前浪”“青出于蓝胜于蓝”，希望本书能起到抛砖引玉的作用，为推动航天液体动力制造工艺技术又好又快地发展起到应有的作用。

本书根据常规液体火箭发动机制造专用设备的专业特点、分类与功能、设计原理与构造、应用与发展等方面的内容编写，并以液体火箭产品为主线，秉承“工程借鉴和实用”的理念，力求做到：基础理论与实践相结合，理论知识和实践工程应用并重，重点突出常规液体火箭发动机专用设备在设计方面的独到之处。本书可供航天技术领域工程技术人员学习和参考，同时也可作为高等院校相关专业学生的课外参考用书。

全书共8章，除概论外，将常规液体火箭发动机制造过程中的专用设备按章节分为：加工设备、钎焊设备、焊接设备、装配设备、检测设备、试验设备和吊装运输设备。本书结合机电设备的一般设计原理的基础，重点介绍常规液体火箭发动机制造过程专用设备在设计过程中的关键技术和诀窍理论。书中还对产品质量控制与检测及设

备管理方面的技术要求进行了适当的阐述。

在本书编写过程中，参阅了国内外同行编写的相关资料，得到了航天液体火箭发动机制造方面专家、朋友及有关单位的大力支持和帮助，在此深表感谢！

由于本书涉及的内容广泛，编者水平有限，加之航天设备日新月异地更新发展，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

陈双凯

2017年12月

# 目 录

第1章 概 论 .....	1
1.1 常规液体火箭发动机简介 .....	1
1.2 常规液体火箭发动机制造技术特点 .....	2
1.3 液体火箭发动机制造专用设备 .....	3
1.3.1 机械加工专用设备 .....	4
1.3.2 焊接工艺专用设备 .....	5
1.3.3 装配专用设备 .....	5
1.3.4 检测、试验专用设备 .....	5
1.3.5 吊装运输专用设备 .....	6
第2章 加工设备 .....	7
2.1 概述 .....	7
2.2 铣槽设备 .....	7
2.2.1 概述 .....	7
2.2.2 机械仿形机床结构与原理 .....	8
2.2.3 数控仿形机床结构与原理 .....	26
2.2.4 液压仿形机床结构与原理 .....	57
2.3 小孔钻设备 .....	69
2.3.1 概述 .....	69
2.3.2 手工加工机床结构与原理 .....	70
2.3.3 数控加工机床结构与原理 .....	76
参考文献 .....	89
第3章 钎焊设备 .....	90
3.1 概述 .....	90
3.2 箱式钎焊设备 .....	90
3.2.1 原理与结构 .....	90
3.2.2 结构设计及计算 .....	96
3.2.3 功率计算 .....	111

3.2.4	关键元件的选取 .....	116
3.2.5	控制系统设计 .....	125
3.2.6	性能试验 .....	138
3.2.7	典型实例 .....	139
3.3	真空钎焊设备 .....	154
3.3.1	结构与原理 .....	154
3.3.2	结构设计及计算 .....	161
3.3.3	加热功率计算及分配 .....	166
3.3.4	真空系统设计及计算 .....	172
3.3.5	电热元件计算 .....	181
3.3.6	性能试验 .....	183
3.3.7	典型实例 .....	184
	参考文献 .....	192
<b>第4章</b>	<b>焊接设备 .....</b>	<b>193</b>
4.1	概述 .....	193
4.2	精密点焊设备 .....	195
4.2.1	工作原理 .....	197
4.2.2	设备组成 .....	197
4.2.3	回转工作台的设计 .....	198
4.2.4	点焊机头移动机构设计与计算 .....	204
4.2.5	电气系统 .....	216
4.3	自动等离子纵缝焊接设备 .....	219
4.3.1	产品简介 .....	219
4.3.2	纵缝焊接的工艺要求 .....	219
4.3.3	等离子纵缝焊接设备设计 .....	220
4.4	TOPTIG 环缝焊接设备 .....	238
4.4.1	产品介绍 .....	238
4.4.2	焊接工艺要求 .....	238
4.4.3	TOPTIG 焊接工艺简介 .....	239
4.4.4	环缝焊接设备设计 .....	240
4.4.5	电气系统 .....	247
	参考文献 .....	248
<b>第5章</b>	<b>装配设备 .....</b>	<b>249</b>
5.1	概述 .....	249

5.1.1 装配形式分类 .....	249
5.1.2 装配精度分析 .....	250
5.2 专用装配设备设计原则 .....	255
5.3 尾喷管装配压合系统 .....	256
5.3.1 产品介绍 .....	256
5.3.2 设备概述 .....	256
5.3.3 设备工作原理 .....	258
5.3.4 压合力的确定 .....	259
5.3.5 结构设计计算 .....	259
5.3.6 液压系统设计 .....	263
5.3.7 设备电气控制系统 .....	264
5.3.8 设备技术参数 .....	266
5.4 液体火箭发动机装配装置 .....	266
5.4.1 入口定位装置设计 .....	267
5.4.2 四机并联装配设备设计 .....	270
5.5 涡轮油泵装配平台 .....	280
5.5.1 涡轮泵支耳定位支架 .....	280
5.5.2 涡轮泵装配支架 .....	283
5.6 其他装配装置 .....	285
5.6.1 收口装置 .....	285
5.6.2 铆接装置 .....	290
参考文献 .....	294
<b>第6章 检测设备 .....</b>	<b>295</b>
6.1 概述 .....	295
6.2 推力室装配焊接测量设备 .....	295
6.2.1 液体火箭发动机推力室介绍 .....	295
6.2.2 发动机推力室工艺要求 .....	297
6.2.3 发动机推力室装配焊接测量设备的工作原理 .....	297
6.2.4 手动式组合装配焊接测量设备 .....	298
6.2.5 自动式组合装配焊接测量设备设计 .....	302
6.2.6 设备应用 .....	316
6.2.7 设备维护及工作环境 .....	317
6.3 液体火箭发动机多余物检测设备 .....	318
6.3.1 多余物及检测概述 .....	318
6.3.2 液体火箭发动机多余物手动检测装置设计 .....	329

6.3.3	推力室多余物自动检查设备设计 .....	336
6.3.4	液体火箭发动机整机多余物自动检查系统设计 .....	353
6.3.5	航天发动机多余物检测系统设计的可靠性验证 .....	361
6.3.6	航天发动机多余物检测技术展望 .....	370
6.4	环块磨损试验机 .....	370
6.4.1	试验目的 .....	370
6.4.2	工作原理 .....	370
6.4.3	机械结构设计 .....	370
6.4.4	控制系统设计 .....	372
6.4.5	技术指标和工作条件 .....	374
6.4.6	控制面板的使用方法 .....	376
6.4.7	试验机操作方法及步骤 .....	378
	参考文献 .....	379
<b>第7章</b>	<b>试验设备 .....</b>	<b>380</b>
7.1	概述 .....	380
7.2	液压系统 .....	380
7.2.1	液压原理 .....	380
7.2.2	液压系统组成 .....	382
7.3	气压系统 .....	382
7.3.1	基本定律及计算公式 .....	382
7.3.2	气压系统组成 .....	383
7.4	系统主要组件设计 .....	383
7.4.1	台架设计 .....	383
7.4.2	导管的设计、选取 .....	387
7.5	软管的选取及安装 .....	392
7.5.1	选用原则 .....	392
7.5.2	安装方式 .....	393
7.6	主要元器件选用 .....	393
7.6.1	动力部分元器件 .....	393
7.6.2	控制部分元器件 .....	394
7.6.3	辅助元器件 .....	400
7.7	强度计算 .....	405
7.7.1	符号 .....	406
7.7.2	气压试验设备零部件强度计算 .....	406
7.8	控制系统 .....	407

7.8.1 控制系统设计的一般步骤 .....	408
7.8.2 PLC 与触摸屏组合控制 .....	410
7.8.3 计算机与软件组合控制 .....	414
7.8.4 PID 逻辑控制 .....	419
7.9 实例一：手动液压强度试验台 .....	426
7.9.1 技术要求 .....	426
7.9.2 系统原理 .....	427
7.9.3 主要元器件选用 .....	427
7.10 实例二：自动气密试验台 .....	428
7.10.1 技术要求 .....	428
7.10.2 系统原理 .....	428
7.10.3 主要元器件选用 .....	430
7.11 实例三：喷嘴流量试验系统 .....	431
7.11.1 喷嘴测量技术要求 .....	431
7.11.2 技术方案 .....	431
参考文献 .....	442
<b>第 8 章 吊装运输设备 .....</b>	<b>443</b>
8.1 概述 .....	443
8.2 发动机吊装运输设备组成及操作流程 .....	445
8.2.1 发动机吊装运输设备组成及功能 .....	445
8.2.2 发动机吊装运输操作流程 .....	446
8.3 发动机吊装运输设备结构设计 .....	451
8.3.1 翻转装置结构设计 .....	451
8.3.2 牵引车结构设计 .....	457
8.3.3 运输拖车结构设计 .....	458
8.3.4 整机运输箱结构设计 .....	461
8.3.5 运输转接环结构设计 .....	464
8.3.6 喷口固定装置结构设计 .....	466
8.4 发动机吊装运输设备可靠性分析 .....	467
8.4.1 结构强度分析 .....	467
8.4.2 模态分析 .....	468
8.4.3 减振性能分析 .....	470
8.5 发动机吊装运输设备试验验证 .....	473
参考文献 .....	477

# 第 1 章 概 论

## 1.1 常规液体火箭发动机简介

我国开展航天运载技术的研究，起步于 20 世纪 50 年代。经过几十年自主创新的发展，先后成功研制了长征系列等多个型号的运载火箭，从常温推进剂到低温推进剂，从串联到捆绑，从一箭单星到一箭多星，实现了从发射卫星到发射载人飞船的跨越式发展，形成了一套相对完备的运载火箭型谱。

常规液体火箭发动机是使用液体化学推进剂作为能源和工质的化学火箭发动机，它主要用于运载火箭和各种航天器的推进系统。根据用途将常规液体火箭发动机分为：芯一级发动机，由四台单机用一级机架并联组成；捆绑式一级火箭发动机，由芯一级发动机和助推级发动机并联组成，它根据实际需要可捆绑两台或四台助推单机；二级发动机，由二级主机和四台游机发动机通过二级机架串联组成。

根据推进剂供应方式将液体火箭发动机分为挤压式发动机和泵压式发动机。挤压式发动机产生的推力相对较小。常规液体火箭发动机采用泵压式双组元推进剂 ( $N_2O_4$  和偏二甲肼常规推进剂)，工作时，推进剂在推力室头部的喷注面碰撞雾化、混合燃烧，产生的燃气自推力室喷管喷出，产生推力推动火箭飞行。作为火箭的动力装置，发动机是火箭能够成功、稳定飞行的关键部件，图 1-1 所示为常规液体火箭发动机的系统工作示意图，图

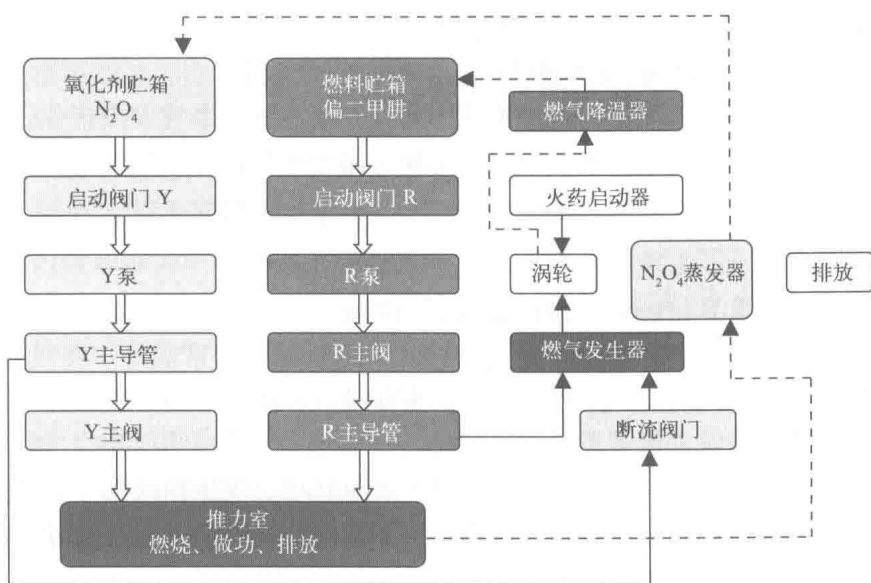


图 1-1 常规液体火箭发动机系统工作原理图

1-2为常规液体火箭发动机外形图,左图为芯一级发动机,右图为二级发动机,仅以一台一级单机为例,每台单机的系统分为4个基本系统:主系统、副系统、增压系统和电控系统。

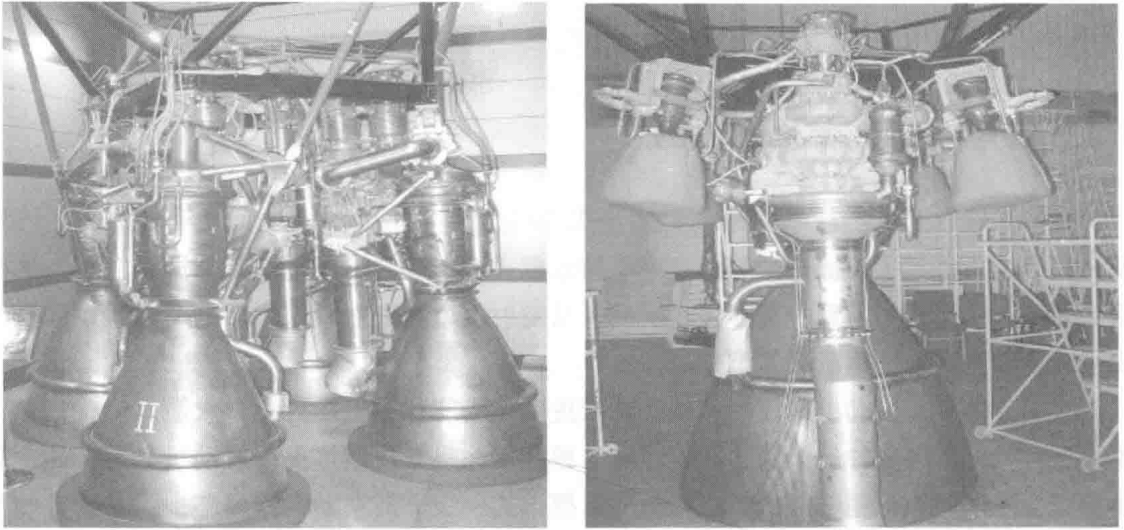


图 1-2 常规液体火箭发动机外形图

主系统是产生推力和向推力室供应推进剂的系统,由启动阀门、电爆管、涡轮泵、主节流圈、隔板节流圈、主阀、电爆管、推力室及导管组成。

副系统是提供涡轮工作能源的系统,由过滤器、氧化剂副断流阀门、电爆管、汽蚀管、单向阀门、燃气发生器、氧化剂副节流圈及导管等组成。

增压系统是向火箭推进剂储箱增压的系统,分为两路,一路为氧化剂增压系统,包括推力室头部和  $N_2O_4$  蒸发器(通向氧化剂贮箱),另一路为燃料增压系统,包括涡轮泵高温燃气导管和燃气降温器(通向燃料贮箱)。

电控系统负责启动和关闭发动机的系统。通过电缆控制电爆管发出指令,使启动阀门和火药启动器及主阀和断流阀门工作,启动系统附属于电控系统,是发动机由非工作状态向工作状态过渡的动力源系统,它由火药启动器及电爆管等组成。

## 1.2 常规液体火箭发动机制造技术特点

常规液体火箭发动机是一种结构复杂、成本高昂、质量要求高、制造难度大的航天机械产品。常规液体火箭发动机制造是一项系统工程,涉及的技术领域相当广泛,既包含了传统的铸造、锻造、钣金、切削加工、热处理、表面处理、焊接和装配等制造技术,又采用了电火花加工、电子束加工和特殊功能涂层等新的工艺技术,还涉及尺寸测量、材料性能(化学、力学、电磁等)检测、结构强度、气密性和无损检测等多种类别的检测和试验技术,常规液体火箭发动机的制造涉及的专业和技术分工详见表 1-1。

表 1-1 常规液体火箭发动机制造专业及技术分工

专业分类	技术分工
特种加工	电解加工、电火花加工、线切割加工、电子束焊接、耐高温涂层喷涂
钣金成型	钣金件加工(冲压、胀形、滚弯、拉深、落料、旋压、超塑加工等)
热处理	热处理、吹砂、弹簧类零件加工
装配焊接	推力室、燃气发生器、机架等装配焊接和试验、涡轮泵零部件、火药启动器壳体的焊接
发动机总装	发动机总装和出厂交付,直属件焊接和装配,导管加工,发动机分解,中和清洗和再装,铝合金产品焊接
表面处理	表面处理、表面涂装、化学铣切、电铸
铸造	发动机泵壳体、离心轮及阀门壳体的铸造
锻造	发动机各类锻件的模锻及自由锻
阀门及启动器制造	阀门及启动器阀门和火药启动器的加工、装配、试验
涡轮泵总装	涡轮泵零组件的机械加工生产及涡轮泵装配、试验等
理化试验	力学试样加工和测试、金相分析、光谱和化学分析、非金属理化测试
无损检测	X光透视检测、磁力探伤、超声波探伤、超声波CT扫描、工业CT扫描

常规液体火箭发动机的关键重要组合件包括:推力室、涡轮泵、燃气发生器、总装直属件(含机架、燃气降温器、 $N_2O_4$ 蒸发器、各种导管、密封件和连接紧固件),发动机推力室、机架、降温器、蒸发器采用了大量的钣金、焊接工艺。钣金工艺分为旋压、胀型、冲压成型等加工方法,焊接工艺采用电弧焊、手工氩弧焊、自动脉冲氩弧焊、自动脉冲全位置焊、等离子焊、电子束焊、钎焊和电阻焊等焊接方法。涡轮泵、阀门的制造采用铸造、锻造制毛坯,结合机械加工工艺,机械加工除采用常规的加工方法外,还大量采用了高精密的数控加工和数控加工中心。另外,涡轮泵一、二级叶轮,小泵壳体,游动喷管内壁和推力室头部加强筋等重要产品采用了电解加工、电火花加工、化学铣切、精密铸造等特种工艺,特殊的零件还涉及表面改性和特殊功能涂层工艺等。主要的质量及性能检测项目除常规的尺寸测量和材料性能外,仍需对推力室、燃气发生器进行液流试验,对喷嘴的液流用专用的流量试验台,以水作为试验介质,保持喷嘴压降,检测喷嘴的流量,对推力室的喷注器盘毛坯进行无损探伤检查,对膜片类的阀门进行膜片切破力试验,对发动机的零部组件内腔进行多余物的检查,对推力室、涡轮泵和发动机总装后进行整体的滚动检查。

### 1.3 液体火箭发动机制造专用设备

在工业制造领域,生产工艺水平的高低取决于生产过程中工艺参数的选择和优化,生产设备、专用工装和专用设备的技术水平,结构件及产品的质量检测水平。其中专用设备的设计和制造起着非常关键的支撑和辅助作用,是不可或缺的重要组成部分,常规液体火箭发动机由于其特殊的产品结构和工艺过程,从原材料毛坯的制造到零部件的加工,直至组合件及发动机整机的装配和运输,都离不开专用设备来保障实现发动机产品的顺利制造。液体火箭发动机制造过程中主要的专用设备类别有:机械加工专用设备、焊接工艺专用设备、装配专用设备、检测试验专用设备及吊装运输专用设备等。

#### 1.3.1 机械加工专用设备

在本书第2章中,编者为大家重点介绍了两类机械加工专用设备,一类为仿形铣槽加工专用机床,该设备专门用于推力室后段内壁冷却通道的铣槽加工,另一类为小孔钻设备,专门用于推力室喷注器环的小孔加工,这两类机械加工设备是液体火箭发动机机械加工专用设备的典型代表。仿形铣槽加工专用机床又分为机械仿形和数控仿形两种。早在1990年,我国就成功研制了火箭喷管内壁外表面直槽铣削加工机床的数控仿形数字化加工控制系统。该数字化加工控制系统的主要思路为设计一种专用的靠模轮仿形仪,靠模轮的滚动轮压靠在工件外表面,利用喷管外表面作为铣槽加工的基面,通过计算机控制滚轮相对铣刀的偏移量来保证铣槽深度。在计算参考偏移量时,利用预先拟合完成的实际壁厚函数曲线关系式,对壁厚误差进行实时的铣削深度补偿。与液压和机械仿形比较,技术上有了较大的改进。该火箭发动机喷管直槽数字化加工系统的研发成功不但解决了喷管铣槽加工过程中的槽深问题,还使壁厚的加工更加均匀,槽底厚度也满足了要求,解决了国家航天制造领域的重大制造技术难题,为我国航空航天事业的发展奠定了基础,但是该设备具有较强的专业性,只适合于少量喷管冷却槽的加工,如果喷管数据有所变化,就很难达到技术要求,并且该设备维修难度大。近几年来,随着曲面激光测量技术的不断成熟和发展,又借着国家对航空航天事业大力支持的东风,喷管冷却槽加工飞速发展。激光技术的广泛应用促使我国在喷管冷却通道加工过程中也应用了激光测量技术。我国的原有喷管加工技术也得到了改进,由以前的机械或液压仿形加工发展为激光仿形加工。在激光仿形加工方案中,选用高精度激光线性传感器,配备高性能计算机和多功能数据采集卡及其他硬件组成了一套数据采集硬件系统。通过对喷管实际外廓进行激光点位测量,进行曲面重构得到喷管实际外廓形状,再依据测量数据自动生成加工程序,实现对喷管的数字化加工。该加工方案在一定程度上提高了喷管冷却通道的加工质量,提高了生产效率,为我国航天事业作出了贡献。

### 1.3.2 焊接工艺专用设备

常规液体火箭发动机制造连接工艺中焊接工艺占据主导地位,焊接技术作为传统、可靠的材料连接技术,在液体火箭发动机的制造过程中发挥着重要作用。以 CZ-2F 火箭发动机为例,其涉及焊接的部位共有 5 000 多处,焊缝数量在 60 000 条以上。相对于其他几种材料连接方法,焊接技术具有连接强度高、密封性好、可实现异形异构件连接的特点,能够很好地适应发动机大振动、高温和高压的工作环境。此外,液体火箭发动机的一个重要参数是推质比,在推力一定的情况下,使用焊接技术可有效降低发动机结构质量,提高发动机推质比。液体火箭发动机焊接生产工艺中用到的焊接专用设备包括:钎焊设备、电阻焊设备、等离子焊接及自动氩弧焊设备等。

钎焊设备是一种通过炉内加热元件将电能转化为热能,从而对工件进行焊接而不需要加工的设备。按照工艺要求,钎焊设备分为:箱式钎焊设备和真空钎焊设备。在液体火箭发动机中,如身部、喷注器、底部组合件、第二底组、隔板等工件均采用了钎焊设备实现连接,使工件获得良好的组织状态及较高的综合力学性能。但由于发动机钎焊工件形状大、截面不规则、焊接工艺的特殊性(热态进出炉、产品旋转同时实测温度等),要保证被钎焊工件均匀受热和加工中保持紧密接触非常困难。国内由于航天产品的特殊性,并无此类专用钎焊设备,因此,为了满足航天产品研制,需设计针对不同航天工件的钎焊设备。本书第 3 章钎焊设备介绍了钎焊设备的设计。

除钎焊设备以外的其他焊接专用设备在第 4 章进行介绍。

### 1.3.3 装配专用设备

常规液体火箭发动机的装配分为零部件装配和发动机总装,在实现过程中,需用到各种专用设备,较为典型的设备有:推力室的装配需用到对接压合设备,涡轮泵装配需用到支撑、定位和入位的综合设备,发动机总装需用四级并联专用小车等。第 5 章重点介绍了液体火箭发动机装配所用设备的专用性,读者在学习这些专用装配设备设计过程的同时,也可了解到一些常规液体火箭发动机的装配知识。

### 1.3.4 检测、试验专用设备

常规液体火箭发动机生产过程中的检测、试验环节是保证发动机制造质量的关键环节,检测及试验数据的时效性和准确性完全依赖于检测和试验设备。第 6、7 章分别以产品为主线,介绍了发动机生产过程中用到的检测、试验专用设备的设计,第 6 章检测设备主要介绍了推力室装配焊接测量设备、发动机多余物检测设备和环块磨损试验设备,第 7 章试验设备主要介绍了液压试验设备、气密试验设备和喷嘴液流试验系统,各种专用设备无不反映出液体火箭发动机制造过程中的特殊性和专业性。