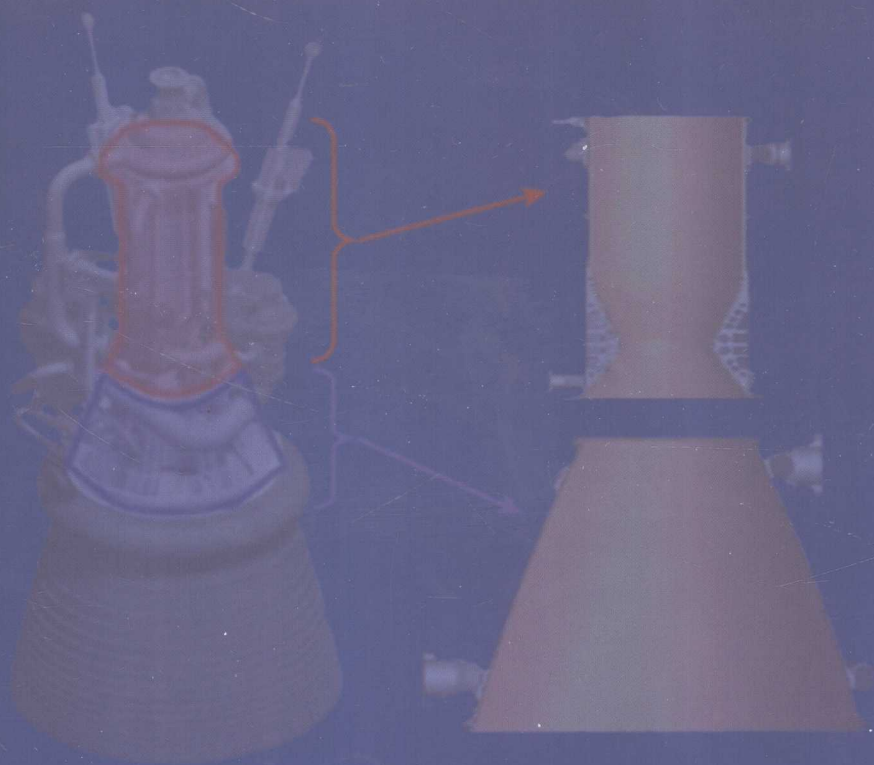




航天科技图书出版基金资助出版

# 液体火箭发动机焊接技术

魏超 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

# 液体火箭发动机焊接技术

魏 超 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

液体火箭发动机焊接技术 / 魏超, 马双民主编. --  
北京 : 中国宇航出版社, 2016. 8  
ISBN 978 - 7 - 5159 - 1087 - 1

I. ①液… II. ①魏… ②马… III. ①液体推进剂火  
箭发动机—焊接工艺 IV. ①V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 045393 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍 封面设计 宇星文化

出版  
发行 **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](http://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 北京国中国画印刷有限公司

版次 2016 年 8 月第 1 版  
2016 年 8 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 20.5 彩插 8 面

字数 496 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1087 - 1

定价 158.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

谨以此书献给为西安航天发动机厂建厂50年做出贡献的人

## 航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快的发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

## 编写委员会

名誉主任	张贵田			
主任	谭永华			
主编	魏超	马双民		
副主编	郭宽峰	李护林	许艺峰	
执行主编	张和平			
编委	陈新红	李珍珍	向彦君	袁晓东
	李双吉	施琼	程晋笠	张京华
	鲁新宾	谢红	毛冬远	吴振中
	张强	杨波	胡亚真	王继长
	朱培府	王永红	张腾	

## 序

开发和探索宇宙是一项造福人类的科技活动，也是促进科学技术发展的有效途径。运载火箭是载人航天、建立轨道空间站、月球探测、通信卫星组网及深空探测等航天活动的重要支柱。作为运载火箭的“心脏”，大运载能力、高性能及高可靠性发动机是运载火箭成功执行任务的基石。

随着国民经济和科技水平的发展，我国液体火箭发动机事业经历了从无到有、从小到大、从弱到强的发展历程。发动机的制造技术也随着我国材料科学、机械设备及电气技术等基础工业的逐渐强盛而快速发展，焊接技术的发展尤为显著。焊接是液体火箭发动机制造的主体工艺，发动机热力组件推力室、传力组件机架、泵驱动组件发生器、姿态控制组件摆动燃烧室及介质输送管路等均为焊接结构。在某种程度上，焊接技术水平决定着发动机的制造水平。在发动机的研制初期，以气焊、焊条电弧焊及火焰钎焊等为主要焊接生产工艺。50余年来，经过航天科技工作者的不断探索，紧跟现代焊接技术发展的步伐，在不断总结和提炼的基础上，发动机的焊接技术得到了长足发展。全位置脉冲自动氩弧焊、（微束）等离子弧焊、高能束电子束焊和激光焊、真空高温钎焊及扩散钎焊等先进的焊接方法得到了全面应用。纵（环）缝自动焊设施、机器人等先进设施的引入，使焊接手段从手工操作逐渐转型为自动化、数字化及智能化，焊接技术得到质的飞跃。通过不断地改进、优化工艺技术，研究人员提炼出了一套适应于航天液体火箭发动机制造的焊接技术。焊接技术的日臻成熟，提高了液体火箭发动机的制造水平，发动机的固有质量和可靠性得到显著提升，为现役长征系列火箭成功飞行提供了坚实的基础。

目前，我国还没有出版过航天液体火箭发动机焊接技术专业论著，本书的正式出版，填补了国内空白。书中除了重点介绍现役常温液体火箭发动机焊接及焊缝检测技术外，还结合现代焊接技术的发展，针对发动机焊接结构，本着提升焊接技术水平、增长接头可靠性的宗旨，对最新的焊接方法和焊缝检测技

术进行了介绍，也部分引入了焊接仿真技术，为广大的工程技术人员开拓了视野和思路。本书以介绍工艺设计方法为主，以工程案例体现解决问题的思路和窍门，相关经验和数据是从事发动机制造的航天工程技术人员历经多年艰苦探索、不断实践的成果总结，是一本较为完整的常温液体火箭发动机焊接工艺技术总结及技术专著，具有较强的系统性、科学性、针对性和实用性。相信此书的出版，将有助于从事焊接工程技术人员驾轻就熟地开展工作，推动发动机制造技术水平的进一步提升。同时，将有助于新生力量在较高的起点上开展新型号的研制工作。给同行及相关人员提供学习和参考，希冀他们从中得到启迪也是编写本书的宗旨。



中国工程院院士

2015年4月



## 前 言

常温液体火箭发动机是 CZ-2、CZ-3、CZ-4 系列火箭的主动力，承担着我国现役火箭的卫星发射、月球探测、载人航天及轨道空间站的建立等一系列重要航天发射任务。西安航天发动机厂参与研制的系列发动机以其优良的质量和可靠性，出色地完成了这些任务，经过几代人五十余年来不断探索和改进技术，发动机制造技术趋于成熟，产品质量稳定可靠。

液体火箭发动机制造技术几乎涵盖了机械制造专业的全部领域，机械加工以车、铣、刨、磨及钳等方法最为普遍，特种加工以铸造、锻造、焊接、热处理及表面处理为主要方法，特种电加工、高能束焊等新技术的使用也越来越普遍。在所有的制造专业中，以焊接工艺对发动机制造质量稳定性的影响最为常见，对可靠性的影响也特别显著。这主要基于发动机的主要部（组）件属于全焊结构，发动机装配时，推进剂管路与组件也采用焊接方式连接，焊接质量的优劣在一定程度上决定着发动机的质量和性能。

随着我国科学技术的发展，发动机的焊接技术也不断提升，从氧-乙炔火焰焊接到钨极氩弧焊的普遍应用，从火焰钎焊到炉中真空钎焊，从发动机总装导管手工焊接到自制自动焊钳实现全位置焊接、再到全位置数字化焊接，这些都展现了发动机研制的曲折和不平凡的历程，凝结着发动机制造工程技术人员和技能人员的心血、聪明才智和奋发有为的进取精神。

为了继承几十年积淀形成的焊接技术，更为了发展液体火箭发动机焊接技术，以适应大推力、高性能、高可靠性发动机的研制需求，我们编写了本书，旨在对常温液体火箭发动机焊接技术做一个较为全面、系统的总结。一则从技术角度进行总结提炼，希望能够给从事火箭发动机设计、制造行业的工程技术人员以启迪，使他们快速成长、成才，以提升发动机的研制效能；二则也想借此载体记录两代科技工作者在液体火箭发动机焊接技术上做出的不凡贡献。

全书用 9 个章节来总结提炼常温液体火箭发动机焊接技术：第 1 章概述了

液体火箭发动机的结构功能以及焊接技术在发动机制造中的应用；第2章论述了发动机常用的焊接方法及材料的焊接性；第3章针对全焊结构的推力室和摆动燃烧室，从焊接结构入手，结合材料分析了采用焊接方法的合理性、焊接工艺设计要点等内容；第4章针对机架这种桁架全焊结构，从材料的焊接性分析入手，对焊接工艺的制定以及控制裂纹和变形工艺措施进行了全面的总结论述；第5章对泵组件典型产品燃气发生器、火药起动机壳体及铝质泵离心轮的焊接工艺进行了总结提炼；第6章到第8章，主要针对换热器、发动机总装密封件“O”形金属密封环以及总装管路的焊接工艺进行总结；第9章论述了发动机特种焊接结构无损检测技术，并对检测的有效性进行了分析评估。全书在涉及到具体产品的焊接技术章节中，有针对性地列举了一些典型焊接质量问题的案例和常见问题的控制、处理方法，具有很强的专业性和针对性，希望以此能更好地展现工程经验的积累对焊接技术发展的贡献和对相关工程技术人员的提示、警示及借鉴。

随着我国航天事业的飞速发展，各种运载工具对液体火箭发动机提出了不同的需求，其中大推力、高性能、高可靠性等需求具有普遍性。我国大推力、高性能、高可靠性液氧煤油发动机的研制已进入工程应用初期，生产工艺仍面临着诸多焊接工艺技术问题，希望该书的出版能够为从事液氧煤油发动机研制的工程技术人员提供参考帮助。

该书的编写参考了许多文献、专著，同时也得到了许多航天知名专家、老前辈的指导，本书主要的编者来自于发动机生产一线工艺人员，他们在本书的编写过程中既要完成日常的工艺工作，又要查阅大量资料、手稿，挤出时间来编写、修订书稿，付出了艰辛的劳动。正是基于专家的不吝指导和编者的辛勤劳动，此书才得以顺利完稿，在此一并表示感谢。



2015年4月

# 目 录

第 1 章 概 论 .....	1
1.1 液体火箭发动机功能与结构 .....	1
1.2 焊接技术在液体火箭发动机制造中的应用 .....	3
1.2.1 焊接技术在推力室、燃气发生器上的应用 .....	3
1.2.2 焊接技术在机架上的应用 .....	4
1.2.3 焊接技术在涡轮泵上的应用 .....	4
1.2.4 焊接技术在发动机装配上的应用 .....	4
1.2.5 焊接技术在换热器上的应用 .....	5
1.3 液体火箭发动机焊接技术展望 .....	5
1.3.1 自动化、智能化、数字化焊接技术 .....	5
1.3.2 精密焊接技术 .....	6
1.3.3 异种材料的焊接技术 .....	6
1.3.4 其他焊接技术 .....	7
1.3.5 焊接数值模拟技术的应用 .....	7
参考文献 .....	9
第 2 章 发动机常用焊接方法及材料的焊接性 .....	10
2.1 发动机常用焊接方法 .....	10
2.1.1 熔化焊 .....	10
2.1.2 固相焊 .....	19
2.1.3 钎焊 .....	22
2.2 发动机常用材料的焊接性 .....	26
2.2.1 发动机用奥氏体不锈钢的焊接 .....	26
2.2.2 发动机用双相不锈钢的焊接 .....	32
2.2.3 发动机用耐热钢的焊接 .....	36
2.2.4 发动机用结构钢的焊接 .....	39
2.2.5 发动机用高温合金的焊接 .....	43
2.2.6 发动机用铝合金的焊接 .....	47
参考文献 .....	50

<b>第 3 章 推力室、摆动燃烧室的焊接</b> .....	51
3.1 推力室焊接技术 .....	51
3.1.1 推力室头部焊接技术 .....	51
3.1.2 推力室身部焊接技术 .....	71
3.1.3 推力室总装焊接技术 .....	83
3.1.4 典型问题的处理 .....	87
3.2 摆动燃烧室焊接技术 .....	99
3.2.1 摆动燃烧室头部焊接工艺 .....	101
3.2.2 摆动燃烧室身部焊接工艺 .....	108
3.2.3 摆动燃烧室总装焊接工艺 .....	119
<b>参考文献</b> .....	124
<b>第 4 章 机架焊接技术</b> .....	125
4.1 机架结构分类及功能 .....	125
4.1.1 概述 .....	125
4.1.2 机架结构分类及特点 .....	125
4.2 机架工艺特性 .....	129
4.2.1 焊接裂纹成因浅析 .....	129
4.2.2 焊接过程应力应变 .....	131
4.3 机架焊接工艺 .....	132
4.3.1 装配焊接约束原则 .....	133
4.3.2 焊接工艺 .....	134
4.4 机架焊接工艺流程 .....	136
4.4.1 工艺流程 .....	136
4.4.2 零、组件焊接 .....	136
4.4.3 机架总装配焊接 .....	138
4.5 工艺要素 .....	140
4.5.1 焊件表面处理 .....	141
4.5.2 待焊接头的修配 .....	141
4.5.3 焊接坡口 .....	141
4.5.4 焊前准备 .....	141
4.5.5 预热、后热 .....	141
4.5.6 熔化焊焊接参数 .....	142
4.5.7 焊接环境条件 .....	142
4.5.8 焊后处理 .....	143
4.6 焊接质量检验 .....	143
4.6.1 焊缝表面质量检查 .....	143

4.6.2 常见焊接缺陷与排除方法 .....	143
4.7 典型问题及控制 .....	144
4.7.1 裂纹问题及分析 .....	144
4.7.2 焊缝裂纹防控措施 .....	146
4.7.3 变形问题分析及防控 .....	147
4.7.4 焊接变形过程控制 .....	147
4.8 液体火箭发动机机架焊接工艺展望 .....	148
4.8.1 概述 .....	148
4.8.2 对焊接自动化、智能化需求 .....	148
4.8.3 焊接自动化可行性 .....	149
4.8.4 关于振动时效技术应用 .....	151
参考文献 .....	152
<b>第5章 涡轮泵组件的焊接 .....</b>	<b>153</b>
5.1 涡轮盖组件焊接工艺 .....	154
5.1.1 结构特点及技术要求 .....	154
5.1.2 焊接工艺性分析及工艺方案 .....	154
5.1.3 焊接工艺及焊缝检测 .....	156
5.2 涡轮盖焊接工艺 .....	157
5.2.1 结构特点及技术要求 .....	157
5.2.2 焊接工艺性分析及工艺方案 .....	158
5.2.3 焊接工艺及焊缝检测 .....	159
5.3 燃气发生器焊接工艺 .....	160
5.3.1 燃气发生器头部焊接工艺 .....	161
5.3.2 燃气发生器身部焊接工艺 .....	168
5.3.3 燃气发生器总装焊接工艺 .....	173
5.4 火药起动机壳体的焊接 .....	184
5.4.1 结构特点及技术要求 .....	184
5.4.2 焊接工艺性分析及工艺方案 .....	184
5.4.3 焊接工艺及焊缝检测 .....	187
5.4.4 常见问题的处理及注意事项 .....	192
5.5 铝质泵离心轮的钎焊 .....	194
5.5.1 结构特点及技术要求 .....	194
5.5.2 焊接工艺性分析及工艺要素 .....	195
5.5.3 焊接工艺及检测 .....	196
5.5.4 常见问题的处理 .....	202
参考文献 .....	204

<b>第 6 章 换热器的焊接</b> .....	205
6.1 概述 .....	205
6.2 蒸发器焊接工艺 .....	206
6.2.1 集合器焊接工艺 .....	206
6.2.2 蒸发器壳体组件焊接工艺 .....	220
6.2.3 蒸发器组合件焊接工艺 .....	221
6.3 燃气降温器焊接工艺 .....	224
6.3.1 结构特点及技术要求 .....	224
6.3.2 焊接工艺性分析及工艺方案 .....	225
6.3.3 焊接工艺及检测 .....	225
6.3.4 常见问题的处理及注意事项 .....	227
<b>参考文献</b> .....	228
<b>第 7 章 “O”形金属密封环电阻对焊技术</b> .....	229
7.1 概述 .....	229
7.2 “O”形金属密封环电阻对焊工艺 .....	229
7.2.1 结构特点及技术要求 .....	229
7.2.2 焊接工艺性分析及技术方案 .....	230
7.2.3 焊接工艺及焊缝检测 .....	233
7.3 常见问题及处理 .....	237
<b>第 8 章 发动机总装管路焊接</b> .....	238
8.1 概述 .....	238
8.2 发动机总装管路焊接技术 .....	239
8.2.1 薄壁小直径导管焊接技术 .....	239
8.2.2 R、Y 主导管焊接工艺 .....	248
<b>参考文献</b> .....	253
<b>第 9 章 发动机焊缝的无损检测技术</b> .....	254
9.1 发动机焊缝结构与特点 .....	254
9.1.1 发动机总装零件焊接结构特点 .....	254
9.1.2 发动机主要部、组件焊接结构特点 .....	254
9.2 常用的焊接无损检测技术 .....	255
9.2.1 常规射线检测技术 .....	255
9.2.2 渗透检测技术 .....	256
9.2.3 氦质谱检漏技术 .....	257
9.2.4 激光全息检测技术 .....	258
9.3 熔化焊质量的无损检测 .....	260

---

9.3.1 常规射线检测 .....	260
9.3.2 渗透检测 .....	275
9.3.3 泄漏检测 .....	278
9.4 钎焊质量的无损检测 .....	280
9.4.1 常规射线检测 .....	281
9.4.2 激光全息检测 .....	288
9.5 无损检测新技术展望 .....	296
9.5.1 数字射线检测技术 .....	296
9.5.2 超声检测技术 .....	304
参考文献 .....	310

# 第 1 章 概 论

## 1.1 液体火箭发动机功能与结构

液体火箭发动机是使用液体推进剂的化学火箭发动机，其主要功能是为运载火箭和各种飞行器提供动力。我国航天运载技术的研究，起步于 20 世纪 50 年代。经过几十年的自主创新，先后成功地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，已形成了一套相对完备的运载火箭型谱。

按照不同的方法可以将液体火箭发动机按图 1-1 所示进行分类。

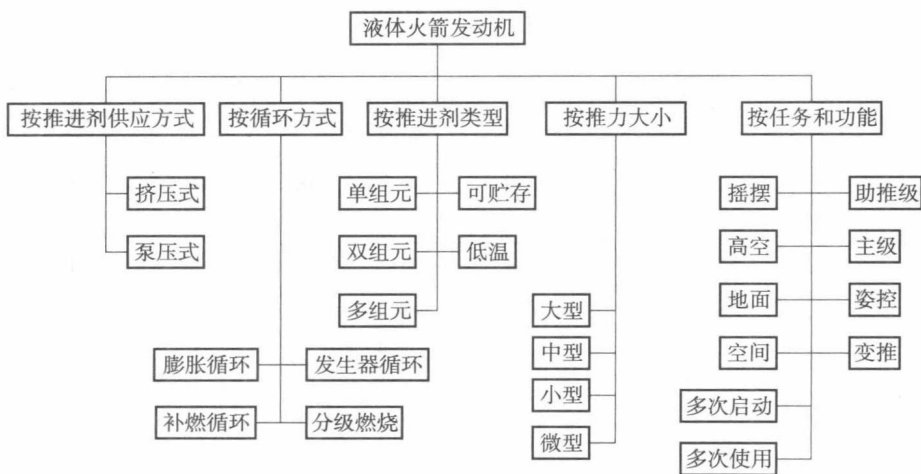


图 1-1 液体火箭发动机分类

液体火箭发动机的主要部（组）件包括推力室、推进剂组元供应系统、燃气发生器、推进剂管路和自动器组件。挤压式发动机产生的推力相对较小，其推进剂组元供应系统采用高压气体将推进剂从贮箱挤压到燃烧室；泵压式发动机是大推力发动机的主要形式，其推进剂供应系统为涡轮泵组件，如图 1-2 所示。通常，除主要部（组）件外，液体火箭发动机还包括给推进剂贮箱增压的换热器以及将发动机推力传给飞行器的机架。

推力室是将推进剂的化学能转变为机械能的装置，一般分为推力室头部和身部两部分，推力室身部又可细分为燃烧室、喷管两部分。推力室头部主要部件为喷注器，推进剂组元从推力室头部的喷注器喷入，在燃烧室内进行雾化、蒸发、混合、燃烧，将推进剂的化学能转化为热能，产生高温、高压的燃气，再经喷管加速膨胀后以高速喷出，从而产生推力。由于推力室身部工作时需经受高压和高温燃气的冲刷，通常采用再生冷却方式对推



力室身部进行降温。目前，再生冷却通道结构主要有管束式和夹层式两种，二者的主要加工工艺均为焊接技术。而推力室头部的喷注器分为直流式喷注器、离心式喷注器和同轴管式喷注器三种，然而不论是哪种喷注器，均采用钎焊方法制造。

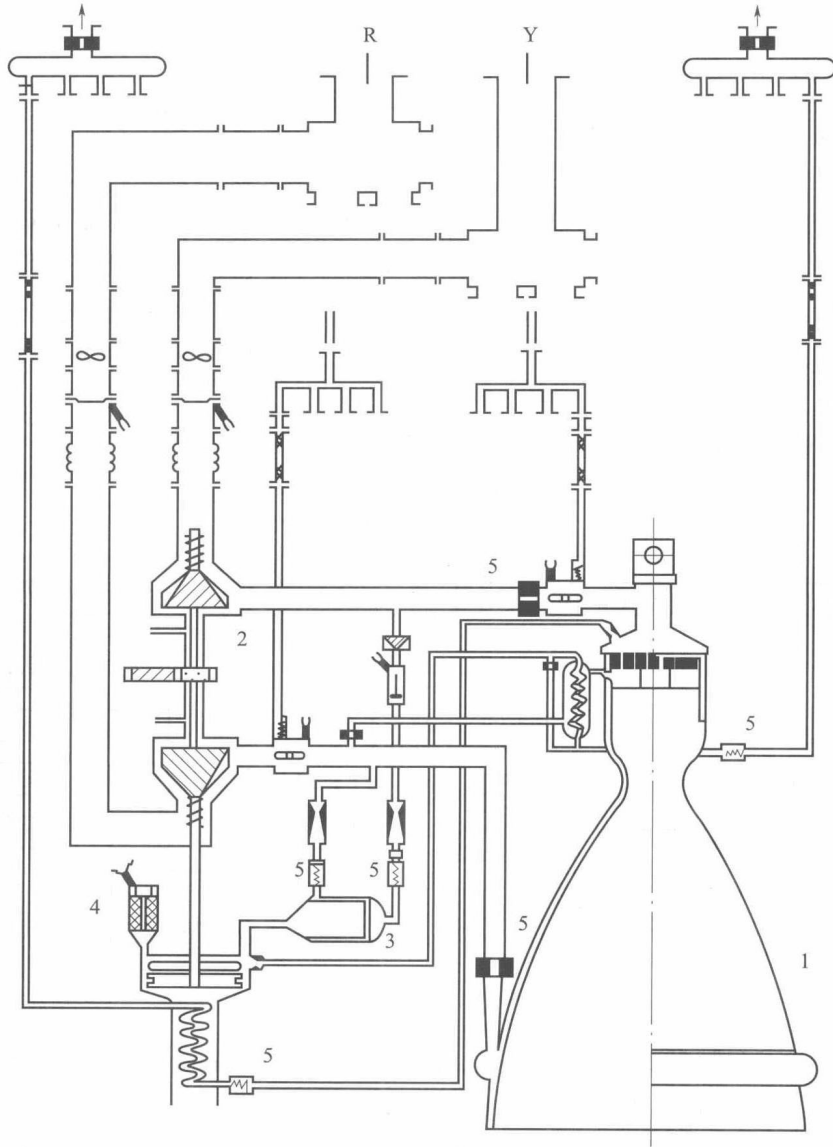


图 1-2 泵压式液体火箭发动机系统原理图

1—推力室；2—涡轮泵；3—燃气发生器；4—火药起动器；5—阀门

涡轮泵的作用是将推进剂组元按一定的流量和压力，持续不断地输送到推力室、燃气发生器中进行燃烧。涡轮泵通常由两台泵（氧化剂泵、燃料泵）和涡轮组成。泵和涡轮一般通过螺纹连接方式将各零、部件组装在一起，例如通过螺纹、花键连接方式将诱导轮和离心轮等零件组装成氧化剂泵或燃料泵等。但在需要承受高温高压的部位，例如涡轮燃气腔、排气管，为提高结构可靠性，一般采用焊接技术。