



航天科技图书出版基金资助出版

液体火箭发动机 特种制造技术

魏超 主编



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

液体火箭发动机特种制造技术

魏 超 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

液体火箭发动机特种制造技术 / 魏超主编. -- 北京 :
中国宇航出版社, 2014. 10
ISBN 978 - 7 - 5159 - 0810 - 6

I. ①液… II. ①魏… III. ①液体推进剂火箭发动机
—制造 IV. ①V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 240526 号

责任编辑 侯丽平 装帧设计 文道思

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中国印刷有限公司

版次 2014 年 10 月第 1 版
2014 年 10 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 28.75

字数 664 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0810 - 6

定价 298.00 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 年作出贡献的人

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地发展。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

副 主 编 郭宽峰 马双民 李护林

执行主编 覃业文

委 员	许艺峰	何安平	杨欢庆	叶 晖
	苗金武	施 琼	黄红耀	何 阳
	朱耀龙	刘兴斌	薛露平	杨战争
	程海英	王 琳	丁凤英	贺秀峰
	潘兆义	刘进涛	陈志民	

序

现代导航、国际通信、信息与情报、陆地和海洋研究、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。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。

中国航天发展到今天，从无到有，从小到大，从弱到强，历经几多艰辛和磨难，依靠自力更生，艰苦创业，开拓进取，掌握和创造了一套独有的航天技术，并举世瞩目，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，针对航天发动机的设计要求和特点，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。在传统的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新技术，提高了液体火箭发动机制造水平，推动了航天技术新发展，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，我国出版航天液体火箭发动机设计与制造的专著很少，本书正式出版，可对此领域有所裨益。书中除了重点论述常温液体火箭发动机特种制造专业技术外，还结合发动机大量采用的新材料、新结构特点，重点对制造过程中的特种工艺进行了深层次的技术研究，书中大量介绍了工艺设计的方法和诀窍，有些经验和数据是广大航天人多年辛勤耕耘、艰苦探索、多年实践的结果和聪明智慧的结晶。它是一本较为完整的常温液体火箭发动机特种工艺技术总结及特种制造技术的专著，具有较强的系统性、针对性、实用性和科学性。坚信《液体火箭发动机特种制造技术》一书的出版，有助于航天发动机制造领域新生力量能在较高的起点上开展工作。同时，也可供同行及相关人员学习和参考，使他们在工作当中有所提高。

张贵田

中国工程院院士

2013年11月

前 言

航天技术飞速发展,离不开先进的航天液体动力制造技术。液体火箭发动机是运载火箭的心脏,它的功能和高可靠性要求,使之结构复杂,工艺要求高,采用的新材料、新技术也较多。因此,发动机特种制造是产品研制中一个十分重要的环节,也是发动机系统制造的重要组成部分。从广义上来说,它是以特种工艺为技术基础,实现产品制造过程中特定功能的一系列的技术总称,所涉及专业有铸造、锻造、焊接、热处理、镀覆和化学热处理、涂装、胶接、电化学加工和电火花加工等。近年来,随着计算机技术、信息化技术、自动化控制技术快速发展,推动了航天特种制造技术不断进步,提升了航天特种制造工艺水平,确保了航天产品制造质量和可靠性。如今航天特种制造技术日新月异,新技术、新材料、新工艺的开发与应用,已成为衡量一个国家先进制造技术水平和能力的重要标志。

在液体火箭发动机长期研制过程中,涌现出一批既有理论,又有实践经验的工程技术人才。应把他们丰富的实践经验从专业、理论的角度,系统地加以固化,留之于文字,传之于后人,既得总结经验之功,又收事半功倍之效。这将有利于指导航天新人工作实践,让他们从书中得到更多的启迪,还将持续推动航天液体动力特种制造技术又好又快发展,这是编写此书的初衷。

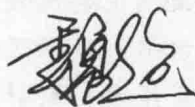
本书根据特种制造技术专业的作用与特点、分类与功能、原理与构造、工艺与制造、应用与发展等方面内容进行编写,并以特种工艺为主线,秉承“工程借鉴和实用”的理念,力求做到:基础理论与工程实践相结合,理论知识和实际工程应用并重,重点突出航天常温液体火箭发动机特种制造技术和水平,侧重于铝合金、不锈钢、高强钢三种主材产品热成形、表面处理与改性、电火花与电化学加工、高温涂层制备等特种制造技术方面的论述。特种焊接虽属特种制造技术范畴,但因焊接是发动机主体工艺,技术独立性、针对性很强,需出专著进行系统介绍,本书不再赘述。本书可供航天技术领域工程技术人员学习和参考,同时也可作为相关高等院校学生的课外参考用书。

全书共8章。第1章概论,对液体火箭发动机分类及组成、特种制造技术特点及发展前景进行了论述。第2章至第8章,主要针对铸造成形技术、热压力加工成形技术、热处理改性技术、金属转化膜和化学镀技术、高温涂层制备技术、特种电火花及电化学加工技术,分别从原理、特点、分类、作用、工艺

基础等方面进行了一般技术性的阐述。重点针对铝合金、不锈钢、高强钢三类材料,结合发动机产品结构特点,从工艺设计分析到工艺方法确定及相关技术保障措施制定等方面,进行了较深层次的探讨,并对产品制造过程中的关键技术和诀窍进行了理论论述。同时,结合典型材料结构以实例形式进行了系统的介绍。书中还对产品质量控制与检测,环保、安全与职业卫生等方面的技术要求进行了适当的阐述。

本书在编写过程中,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特种制造方面专家、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,加之航天特种制造技术发展迅速,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。



2013年10月

目 录

第1章 概 论	1
1.1 液体火箭发动机分类及组成	1
1.2 液体火箭发动机制造技术特点	3
1.2.1 特殊性能新材料的应用增加了制造技术难度	3
1.2.2 轻质化要求增加了产品的结构复杂程度	4
1.2.3 特种制造技术占有重要地位	5
1.2.4 保证符合性要求的特色检测技术	6
1.3 液体火箭发动机特种制造技术展望	7
1.3.1 表面工程技术的发展趋势	7
1.3.2 电加工等非传统加工技术的发展趋势	8
1.3.3 热成形技术发展趋势	8
参考文献	10
第2章 铸造成形技术	11
2.1 概述	11
2.2 铝合金砂型铸造	11
2.2.1 零件结构的铸造工艺性分析	12
2.2.2 铸造工艺方案确定	16
2.2.3 铸造工艺装备	22
2.2.4 铸型制造	33
2.2.5 合金熔炼、浇注	42
2.2.6 热处理工艺对合金力学性能的影响	52
2.2.7 铸件后处理	54
2.2.8 典型铸件砂型铸造工艺	55
2.3 高温合金、高强不锈钢熔模精密铸造工艺	63
2.3.1 熔模铸造概述	63
2.3.2 铸造工艺方案设计	65
2.3.3 激光快速成型制模	68
2.3.4 金属压型制模	71

2.3.5 蜡模组合	82
2.3.6 制壳	82
2.3.7 脱蜡	86
2.3.8 型壳焙烧	86
2.3.9 真空熔炼浇注	87
2.3.10 铸件清理	90
2.3.11 熔模铸件的修补	90
2.3.12 铸件缺陷分析	92
2.3.13 典型铸件熔模精密铸造工艺	95
2.4 铸件检测	102
2.4.1 磁粉探伤	102
2.4.2 荧光探伤	103
2.4.3 超声波探伤	103
2.4.4 射线探伤	103
2.4.5 渗漏试验	103
2.5 计算机技术在铸造中的应用	104
2.5.1 铸造过程数值模拟技术	104
2.5.2 金属增材制造技术	110
2.5.3 并行铸造模式	114
2.6 安全、环保	116
2.6.1 铸造过程中的不安全因素	116
2.6.2 铸造过程的安全防护重点	118
2.6.3 铸造过程的安全操作要求	118
2.6.4 铸造过程的环保措施	119
参考文献	120
第3章 热压力加工成形技术	121
3.1 概述	121
3.1.1 热压力加工技术的原理和作用	121
3.1.2 热压力加工专业的现状和发展趋势	121
3.2 热压力加工的特点和分类	122
3.3 热压力加工的工艺基础	123
3.4 液体火箭发动机特种合金的压力加工成形技术	124
3.4.1 高温合金零件的热加工成形技术	124
3.4.2 不锈钢及耐热钢零件的热加工成形技术	138
3.4.3 钛合金零件的热加工成形技术	148

3.4.4 铝合金及铜合金零件的热加工成形技术	156
3.5 锻件质量检验与控制	161
3.5.1 锻件缺陷分类	161
3.5.2 锻件质量常规检测内容	162
3.5.3 锻件的质量控制	162
3.6 安全、环保	162
3.6.1 锻造安全控制	162
3.6.2 锻造环境保护	163
参考文献	164
第4章 热处理改性技术	165
4.1 概述	165
4.2 热处理改性技术的分类及特点	166
4.2.1 基本热处理	166
4.2.2 化学热处理	171
4.2.3 感应热处理	174
4.3 不锈钢的热处理	178
4.3.1 不锈钢的分类	178
4.3.2 马氏体不锈钢	178
4.3.3 奥氏体不锈钢	194
4.3.4 奥氏体—铁素体不锈钢	201
4.4 铝合金	205
4.4.1 铝合金的分类	205
4.4.2 变形铝合金	207
4.4.3 铸造铝合金	218
4.4.4 铝合金的热处理缺陷	221
4.5 高强钢	223
4.5.1 高强钢的定义	223
4.5.2 高强钢的牌号及合金元素的作用	223
4.5.3 高强钢的热处理	224
4.5.4 典型零件的热处理	226
4.6 其他材料的热处理	230
4.6.1 高温合金	230
4.6.2 钛及钛合金	234
4.7 热处理工艺制定原则与程序	242
4.7.1 热处理工艺制定原则	242

4.7.2 热处理工艺制定依据	245
4.7.3 工艺规程的基本内容	245
4.7.4 工艺规程编制程序	248
4.8 质量控制及检测方法	249
4.8.1 热处理全面质量控制	249
4.8.2 热处理基础条件控制	249
4.8.3 热处理中的质量控制	251
4.8.4 检测方法	257
4.9 安全、环保、卫生	260
4.9.1 热处理生产中的环保技术安全	260
4.9.2 热处理生产环境的保护	260
4.9.3 研究无公害的热处理技术	261
4.9.4 热处理生产中常见的有害因素	262
4.9.5 热处理生产的技术安全防护措施	262
4.10 热处理改性技术发展的趋势	263
4.10.1 节能环保	263
4.10.2 精益生产	263
4.10.3 加强热处理基础研究	263
4.10.4 发展信息化的智能热处理技术	263
参考文献	264
第5章 金属转化膜和化学镀技术	265
5.1 金属转化膜技术	265
5.1.1 概述	265
5.1.2 特点及分类	265
5.1.3 工艺基础	268
5.1.4 铝及铝合金阳极氧化	269
5.1.5 铬酸盐钝化处理	285
5.1.6 其他工艺简介	288
5.1.7 质量控制和检测方法	291
5.2 化学镀技术	293
5.2.1 概述	293
5.2.2 特点及分类	293
5.2.3 工艺基础	294
5.2.4 化学镀工艺技术应用	297
5.2.5 其他工艺简介	301

5.2.6 质量控制与检测方法	302
5.3 安全、环保	304
5.3.1 技术安全	304
5.3.2 环境保护	304
参考文献	305
第6章 高温涂层制备技术	306
6.1 概述	306
6.2 高温涂层的特点和分类	307
6.2.1 高温涂层的特点	307
6.2.2 高温涂层的分类	309
6.3 工艺基础	310
6.3.1 涂覆烧结复合工艺	310
6.3.2 等离子喷涂工艺	312
6.4 涂层制备的特种工艺技术	314
6.4.1 抗高温氧化的硅化物涂层	314
6.4.2 抗烧蚀的搪瓷涂层	322
6.4.3 高温隔热的热障涂层	324
6.5 其他工艺方法简介	337
6.5.1 硅化物涂层的磁控溅射和真空硅化处理制备技术	337
6.5.2 硅化物涂层的真空等离子喷涂和真空热处理复合制备技术	338
6.5.3 高温隔热热障涂层的电子束-物理气相沉积制备技术	338
6.6 质量控制和检测方法	339
6.6.1 涂层的微观结构分析表征方法	339
6.6.2 涂层的力学性能分析表征方法	341
6.6.3 涂层物理性能的分析表征方法	343
6.6.4 涂层质量的检测与表征	346
6.7 安全、环保、卫生	347
参考文献	348
第7章 特种电火花加工技术	349
7.1 概述	349
7.2 电火花成形加工技术	349
7.2.1 电火花成形加工原理	349
7.2.2 电火花成形加工的特点、分类	350
7.2.3 电火花成形加工工艺基础	351
7.2.4 工艺设计	354

7.2.5 特殊材料的电火花成形加工	363
7.2.6 典型应用实例	364
7.3 电火花线切割加工技术	369
7.3.1 电火花线切割加工原理	369
7.3.2 电火花线切割加工的特点、分类	369
7.3.3 电火花线切割加工工艺基础	370
7.3.4 工艺设计	377
7.3.5 特殊材料的电火花线切割加工技术	381
7.3.6 典型应用实例	382
7.4 其他特种电火花加工技术简介	383
7.4.1 电火花磨削加工	383
7.4.2 超声电火花复合加工	384
7.4.3 电火花表面强化和刻字	384
7.4.4 高速小孔加工	384
7.5 质量控制及检测方法	385
7.5.1 人员要求	385
7.5.2 设备、工装	385
7.5.3 工艺控制	385
7.5.4 生产检验	385
7.6 安全、环保、卫生	385
7.6.1 电气安全	385
7.6.2 火灾的预防	386
7.6.3 有害气体的防护	386
7.6.4 废电极丝的防护	386
参考文献	387
第8章 特种电化学加工技术	388
8.1 电解加工	388
8.1.1 概述	388
8.1.2 特点和分类	389
8.1.3 工艺基础	391
8.1.4 常用材料电解工艺技术	400
8.1.5 其他工艺技术简介	403
8.1.6 质量控制及检测	405
8.1.7 电解加工发展趋势	406
8.2 电镀	407

8.2.1 概述	407
8.2.2 特点及分类	408
8.2.3 工艺基础	408
8.2.4 工艺技术	412
8.2.5 其他工艺简介	422
8.2.6 质量控制与检测方法	423
8.3 电铸	424
8.3.1 概述	424
8.3.2 特点与分类	425
8.3.3 工艺基础	425
8.3.4 电铸镍工艺技术的应用	428
8.3.5 其他工艺技术简介	433
8.3.6 质量控制与检测	435
8.4 安全、环保	436
8.4.1 技术安全	436
8.4.2 环境保护	436
参考文献	438

第 1 章 概 论

1.1 液体火箭发动机分类及组成

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，实现了从卫星发射到载人飞船发射的跨越式发展，已形成了一套相对完备的运载火箭型谱。

液体火箭发动机是使用液态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。液体火箭发动机可根据用途、使用条件、推进剂供应方式及推进剂组元等进行分类。

根据用途将液体火箭发动机分为：主发动机（航天运载器、弹道导弹、载人和不载人轨道飞行器等）、复合发动机（液体火箭发动机+空气喷气发动机或液体火箭发动机+冲压式空气喷气发动机等）、辅助发动机、控制系统用发动机。

根据使用条件将液体火箭发动机分为：一次启动发动机、二次重复启动发动机、多次启动发动机、多次使用发动机。

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；泵压式发动机是大推力发动机的主要形式，可进一步分为补燃循环和非补燃循环两类。补燃循环发动机是指驱动涡轮泵的燃气不直接排放到外界，而是进入主燃烧室进行补充燃烧的发动机。非补燃循环发动机则是指驱动涡轮泵的燃气未经过进一步的充分燃烧，直接向外界排放的发动机。

根据发动机所用推进剂组元数目可将液体火箭发动机分为：单组元发动机、双组元发动机和三组元发动机。大多数液体火箭发动机属于双组元发动机。此外，还可按照推进剂的沸点将发动机分为常温发动机和低温发动机，常温发动机可在加注推进剂后长期贮存。

图 1-1 为非补燃循环可贮存推进剂的液体火箭发动机的系统原理图，它主要由推进剂供应系统、启动系统、增压系统、推进剂利用系统等组成，其主要部组件通常包括推力室、涡轮泵、各种阀门、火药启动器、燃气发生器、机架、各种管路、电气装置及一些辅助部组件。现代高压补燃循环发动机（如液氧煤油发动机）通常由推进剂供应系统、启动点火系统、吹除系统、增压系统、抽真空系统、预冷系统和调节系统等组成，它包含了更多的部组件，如图 1-2 所示。