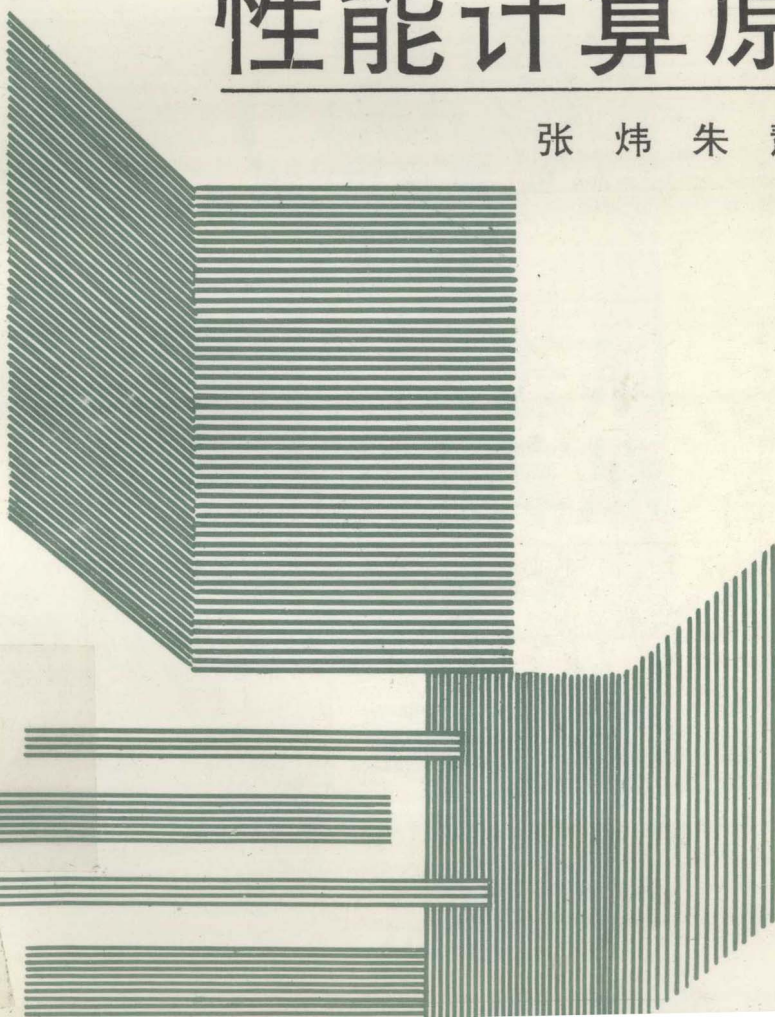


● 研究生教材 ● 研究生教材

固体推进剂 性能计算原理

张 炜 朱 慧 编著



V512
1005

V512
1005-1

■ 研究生教材 ■



张炜 朱慧 编著

固体推进剂 性能计算原理

国防科技大学出版社



200127788

200127788

图书在版编目 (CIP)

固体推进剂性能计算原理/张炜;朱慧编著—长沙:国防科技大学出版社,1996.3

ISBN 7-81024-359-4

- I 固体推进剂性能计算原理
- II 张炜 朱慧
- III 固体推进剂—性能—计算—原理
- IV V512

责任编辑:张建军

责任校对:罗青

封面设计:陆荣斌

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731) 4555681 邮政编码:410073

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

开本 850×1168 毫米 1/32 印张:16.8125 字数:422 千

1996年3月第1版第1次印刷 印数:700册

ISBN 7-81024-359-4
V·11 定价:16.80元

885751008

内 容 简 介

本书论述了固体推进剂性能计算的理论基础和计算原理。全书分两部分。第一部分阐述了固体推进剂能量性能的化学、热力学计算原理以及计算方法。第二部分论述了固体推进剂燃烧性能模拟计算的基础知识和燃烧理论。其中第四章至第七章分别介绍了流体力学基础、燃烧物理基础以及化学动力学控制和扩散控制的燃烧工况处理；第八章至第十四章以专题形式分别讨论了高氯酸铵复合推进剂、经典双基推进剂、硝胺复合推进剂、复合改性双基推进剂、新型高能推进剂、铝粉和多孔推进剂的燃烧特征和燃烧理论。本书内容反映了该领域内 90 年代初国内、外的最新研究成果。

本书可作为固体推进剂和固体火箭发动机等有关专业研究生的教科书或高年级本科生的专业参考书，亦可供有关科技人员参考。

前言

固体推进剂是固体火箭发动机的主要能源,其性能优劣决定了航天器和导弹武器的运载能力,而与发动机工作过程密切相关的固体推进剂能量特性和燃烧特性是推进剂的两个重要性能指标。长期以来,对固体推进剂能量性能和燃烧性能的测试和调节主要依靠实验来进行,这样往往造成周期长、成本高和重复性差等弊端。为了快速、经济、便捷地预估推进剂的能量特性和燃烧特性,需要人们在充分认识固体推进剂的能量转换过程、燃烧特征及机理的基础上,建立相应的理论和模型,进行理论计算,并进而指导固体推进剂配方的选择和调节。本书就是在总结了当今国内外学者和本书作者在固体推进剂性能计算研究成果的基础上,辅以必要的基础知识撰写而成的。

本书可作为固体推进剂、固体火箭发动机和火工品等专业的研究生和高年级本科生的教科书,亦可作为从事本领域研究工作的科技人员的参考书。本书要求读者具备一定的化学、热力学、化学动力学和数学等方面的基础知识。

全书分两个部分。第一部分阐述了固体推进剂能量性能计算原理。其中第二章主要讨论了固体推进剂能量计算的基本原理和步骤;第三章重点讨论了某一热力学状态下燃气平衡组成的计算方法。

本书第二部分论述了固体推进剂燃烧性能模拟计算的基础知识和燃烧理论。由于固体推进剂在发动机中的燃烧是一个极其复杂的物理-化学过程,它受到燃烧过程中反应物的扩散混合、传热等物理过程以及化学反应动力学等众多因素的影响,因此要实现固体推进剂燃烧性能的理论计算具有相当的难度。而且在大多数情况下,由于缺乏对推进剂燃烧过程中涉及的燃烧基础知识方面

的认识,使得这个工作变得更加困难。因此本书在讨论固体推进剂的燃烧理论之前,用四章的篇幅介绍了流体力学基础、燃烧物理基础、化学动力学控制及扩散控制的燃烧工况的数学处理,以便为固体推进剂燃烧理论的学习打下较为坚实的基础。

固体推进剂燃烧性能计算的另一个问题是初始数据的缺乏和不统一,因此作者在讨论各类推进剂的燃烧特征和燃烧理论时,有意将常用数据和实验数据列出。

由于固体推进剂的燃烧除与固体火箭发动机的工作条件、扩散混合、传热和化学反应动力学基本规律有关外,还强烈地依赖于固体推进剂的类型、配方参数及其均匀性、致密性等因素,因此对其燃烧现象和燃烧理论无法一概而论。本书从第八章开始,按推进剂的类型、特征划分,以专题形式分别讨论了高氯酸铵复合推进剂、经典双基推进剂、硝胺复合推进剂、复合改性双基推进剂的稳态燃烧特征和燃烧理论。第十二章介绍了当今固体推进剂的最新发展领域之一——新型高能推进剂的配方特征和燃烧性能。第十三章讨论了铝粉的燃烧特征及数学模拟方法。第十四章则介绍了当今固体推进剂的另一个热点——多孔推进剂的配方特点、燃烧特性、稳态对流燃烧理论以及爆燃转爆轰理论。这部分内容反映了该领域内国内外学者和本书作者的最新科研成果。

本书的出版得到了校研究生院领导和有关同志的大力支持,张建军编辑对本书的出版工作做了大量的工作,在此表示衷心的感谢。

希望本书的问世为从事固体推进剂性能理论计算的教学、科研人员提供较为系统并具有一定专业深度的知识,对科研工作有所帮助。由于水平所限,错误和不当之处在所难免,请读者指正。

作者

1995年6月于长沙

目 录

第一章 绪论

- § 1.1 概述 (1)
- § 1.2 固体推进剂性能计算发展现状 (6)
- § 1.3 固体推进剂性能计算的一般过程 (8)
- § 1.4 本书主要内容及涉及的主要基础知识 (10)

第一部分 固体推进剂能量性能理论计算

第二章 固体推进剂能量性能精确计算原理

- § 2.1 固体推进剂的能量特性参数 (15)
- § 2.2 固体推进剂能量性能精确计算原理 (23)
- § 2.3 固体推进剂能量性能精确计算的一般过程 (25)

第三章 混合物系定温定压平衡组成计算

- § 3.1 概述 (38)
- § 3.2 逐步近似法求解恒温恒压条件下产物的平衡组成 (39)
- § 3.3 最小自由能法求解定温定压下产物的平衡组成——温度尝试法
..... (54)
- § 3.4 最小自由能法求解某一热力学状态下产物的平衡组成——New-
ton-Raphason 迭代法 (73)

第二部分 固体推进剂燃烧性能模拟计算

第四章 流体力学基础

- § 4.1 概述 (90)
- § 4.2 流体的基本物理性质 (90)
- § 4.3 流体静力学 (100)
- § 4.4 流体运动学概述 (106)
- § 4.5 流体动力学积分形式的基本方程 (118)

§ 4.6	流体动力学微分形式的基本方程	(133)
第五章 燃烧物理基础		
§ 5.1	概述	(153)
§ 5.2	分子输运的基本定律	(154)
§ 5.3	分子输运系数的计算	(160)
§ 5.4	速度边界层	(167)
§ 5.5	热边界层及通过边界层的传热	(170)
§ 5.6	自由对流中的传热	(172)
第六章 化学动力学控制的燃烧		
§ 6.1	燃烧现象的分类	(180)
§ 6.2	着火	(187)
§ 6.3	Semenov 非稳态热自燃理论	(189)
§ 6.4	自燃; Frank-Kamenetski 稳态分析	(199)
§ 6.5	预混火焰的传播理论	(204)
第七章 扩散过程控制的燃烧		
§ 7.1	概述	(214)
§ 7.2	气体燃料射流燃烧	(216)
§ 7.3	液体燃料燃烧中的扩散火焰	(223)
§ 7.4	固体燃料的燃烧	(249)
第八章 高氯酸铵复合固体推进剂稳态燃烧理论		
§ 8.1	引言	(265)
§ 8.2	燃烧现象和机理	(269)
§ 8.3	AP 复合推进剂稳态燃烧模型	(280)
第九章 双基推进剂稳态燃烧理论		
§ 9.1	双基推进剂燃烧特征	(356)
§ 9.2	双基推进剂稳态燃烧模型	(363)
第十章 硝胺复合推进剂稳态燃烧理论		
§ 10.1	硝胺的热分解及爆燃	(377)
§ 10.2	硝胺单元推进剂的稳态燃烧理论	(384)
§ 10.3	硝胺复合推进剂的稳态燃烧理论	(393)

§ 10.4	硝胺/AP 少烟复合推进剂的稳态燃烧理论	(409)
第十一章 复合改性双基推进剂的稳态燃烧		
§ 11.1	概述	(420)
§ 11.2	AP-CMDB 推进剂的稳态燃烧理论	(423)
§ 11.3	硝胺-CMDB 推进剂的稳态燃烧	(430)
第十二章 高能复合推进剂的稳态燃烧		
§ 12.1	概述	(436)
§ 12.2	硝酸酯含能增塑剂类高能推进剂	(437)
§ 12.3	含能粘合剂类高能推进剂	(448)
§ 12.4	新型氧化剂和金属添加剂的应用	(479)
第十三章 复合推进剂中铝粉的燃烧及模拟		
§ 13.1	铝粉的燃烧	(495)
§ 13.2	铝凝团尺寸的表征	(499)
§ 13.3	复合推进剂中铝燃烧的模拟	(501)
第十四章 多孔推进剂的稳定对流燃烧及爆燃转爆轰		
§ 14.1	引言	(506)
§ 14.2	透气性推进剂的组成和燃烧特征	(507)
§ 14.3	透气性推进剂稳定对流燃烧的模拟	(513)
§ 14.4	高限制条件下多孔推进剂的两相流燃烧理论	(522)

第一章 绪 论

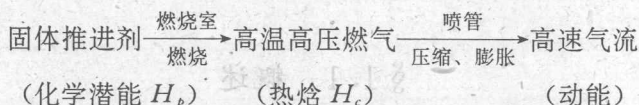
§ 1.1 概述

火箭发动机是航天飞行器及导弹武器系统的推进装置。第二次世界大战末期，纳粹德国最早开发出 V-1、V-2 型飞弹，作为秘密武器率先使用，袭击英伦三岛，妄图挽回其败局。第二次世界大战结束以后，世界各发达国家竞相开展其研究，最初主要研制军用导弹武器系统，至今已开发出形形色色的战术、战略导弹和反导导弹等。目前高性能导弹武器是各国军队的尖端高技术装备之一，其在现代战争中的作用在海湾战争中就可略见一斑。在海湾战争中，美军利用“爱国者”反导导弹，有效地拦截了伊拉克“飞毛腿”导弹对其军事设施等的袭击，充分体现了高性能导弹系统的重要作用。另一方面，火箭发动机也广泛用于航天、宇宙开发与研究等和平利用方面，美国的“阿波罗”登月，航天飞机，欧洲航天局的“阿丽亚娜”系列火箭等，举世闻名；我国开发的“长征”系列火箭，不仅为我国航天、国防事业作出了巨大贡献，同时也打入国际市场，多次出色完成了发射“澳星”、“瑞星”等任务，壮了国威。

火箭发动机由发动机壳体和推进剂构成。按推进剂的物态划分，可分为液体火箭发动机和固体火箭发动机两大类。由于固体推进剂直接以壳体结合或以装填方式预先装填在固体火箭发动机中，具有发射准备时间短、机动性强等优点，因此这类固体火箭发动机广泛用于战术、战略导弹武器及探空火箭等方面。

火箭发动机实际上是一个能量转换系统。在该系统中，推进

剂通过燃烧产生的高温高压气体作为发动机的工质，在喷管中进行绝热膨胀，并把气体具有的显能转换为动能，这样，系统就获得一个反作用力。因而，固体火箭发动机的能量转换过程可表示为



火箭发动机由燃烧室和收敛-扩张喷管组成。推进剂在燃烧室内燃烧产生高温高压燃气，有时还伴随产生少量的凝聚相燃烧产物。在稳态燃烧期间，燃烧室压强近乎为常数，在燃烧室内燃气的流速通常是很小的。然而，在喷管的收敛段，压强下降，流速增加；在喷管的喉部，流速达到音速；当燃气流到喷管扩散段时，速度变为超音速，而压强继续下降，在喷管出口，流速达到最大，而压强则降低到近似于环境压强。压强 P 、速度 u 、温度 T 和作用在发动机轴向的压强分布示于图 1-1。

图 1-2 为火箭发动机的原理图。发动机的推力是由发动机内的压强分布形成的。如果知道作用于发动机内表面上的压强分布，就可以用下式计算出发动机的推力：

$$F = \int P dA \quad (1-1)$$

式中 P —压强；

A —发动机的内表面积。

积分须沿整个内表面进行。

在发动机整个工作时间 t_b 内，推力产生的总冲量（简称总冲）记作 I ，则

$$I = \int_0^{t_b} F dt \quad (1-2)$$

设推进剂的装药总质量为 M_p ；单位质量推进剂产生的冲量称为平均比冲量（简称平均比冲）记为 I_p ； m_t 为每秒喷出的燃烧产

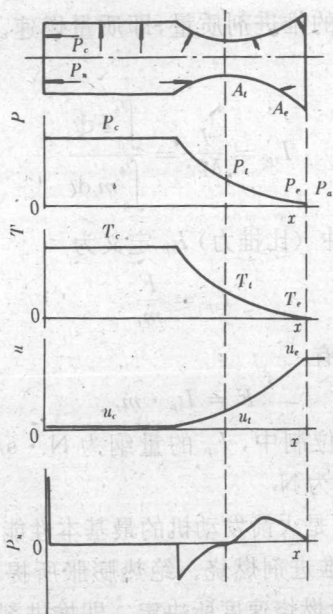


图 1-1 压强、温度、速度和作用于发动机轴向的压强分布

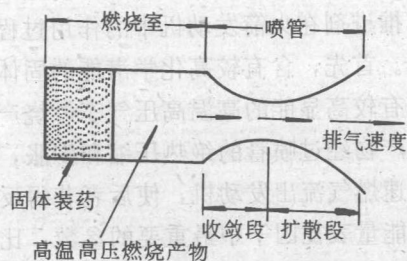


图 1-2 火箭发动机原理图

物质量,称为燃烧产物秒流量,根据质量守恒定律, $\dot{m}_t$ 也是每秒整个推进剂燃面烧掉的推进剂质量,即质量燃速。根据比冲定义则有

$$I_{sp} = \frac{I}{M_p} = \frac{\int_0^{t_b} F dt}{\int_0^{t_b} \dot{m}_t dt} \quad (1-3)$$

任意瞬间的比冲(比推力) I_{sp} 定义为

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}_t} \quad (1-4)$$

由式(1-4)变形则有

$$F = I_{sp} \cdot \dot{m}_t \quad (1-5)$$

在国际标准单位制中, I_{sp} 的量纲为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{kg}$, $\dot{m}_t$ 的量纲为 kg/s ,则推力的单位为 N 。

显而易见,推力是火箭发动机的最基本性能之一。由式(1-5)可以看出,推力由推进剂燃烧、绝热膨胀所提供的比推力(比冲)和推进剂的质量燃烧速度所决定,即推进剂的能量性能和燃烧性能对整个发动机推力起决定性作用。因此开展推进剂能量性能、燃烧性能以及相应性能调节技术研究的重要性也就不言而喻了。

前已述及,推进剂在火箭发动机中的作用过程是由两个能量转换过程构成的。首先,含有较高化学潜能的固体推进剂在发动机中燃烧产生具有较高显能的高温高压气态燃烧产物;然后,这些高温高压气态产物经过喷管的绝热压缩和膨胀,逐渐将其显能转化为动能,高速燃气流出发动机,使后者获得反向作用力即推力。作为推进剂能量表征因子中最重要的参数,比冲是单位质量推进剂提供的推力。这样,比冲的预估或计算就可以简单地归结为热力学计算问题。

而对推进剂燃烧速度的预估则不然,它是一个复杂的动力学

计算过程。推进剂的燃烧过程牵涉到复杂的能量传递、质量传递、动量传递和化学反应过程。从化学反应来讲，固体推进剂燃烧分凝聚相反应区和气相反应区两大区域。以复合固体推进剂为例，凝聚相反应区主要是固体推进剂中两大主要组分——氧化剂和粘合剂的热分解反应以及两者热分解产物间的相互反应，这些反应产物主要以气态形式进入气相反应区。另一方面，由于推进剂燃烧很快，随着燃面的快速后移，一些未来得及反应或未反应完全的推进剂可能以小微团的形式进入气相，有待进一步反应。在气相反应区，由于气相火焰区温度很高，凝聚相反应产物进一步进行强烈的氧化反应——呈现出燃烧的特征。气相反应速度受氧化性物质和燃料（可燃性物质）的扩散混合速度和化学反应速度所控制，而凝聚相反应吸收的热量又来源于气相反应放出热量的强烈热反馈作用，因此，固体推进剂燃烧机理乃至燃烧性能计算远比推进剂能量性能计算要复杂得多，而且难度也显然要大得多。

装填于固体火箭发动机燃烧室内的固体推进剂药柱除应具备规定的比冲和燃烧速度以满足推力要求以外，还应满足某些其它性能要求。如大型壳体结合固体火箭发动机中推进剂装药通过包覆层、绝热层与发动机壳体粘结在一起，作为一个整体的承力构件。这样就要求推进剂装药应能承受运输、贮存、起飞加速度以及飞行过程中各种载荷的作用，且不影响其装药结构完整性和内弹道性能。换言之，固体推进剂药柱应具备一定的抗载荷能力，具备一定的力学性能。

同样，推进剂贮存性能优劣也是关系到该种推进剂配方能否应用以及降低推进剂成本至关重要的因素。因而如何评价、预估推进剂的贮存期，延缓推进剂老化过程也是固体推进剂性能研究的重要课题。

除此以外，推进剂制造的工艺性能、危险性能也是值得研究的方面。

以上固体推进剂诸项性能的测试,须经过捏合、浇铸发动机或方坯药、固化、性能测试等过程。整个过程少则十天至两周左右,长则数月,测试、研究周期很长。另一方面,推进剂制造成本高,性能测试需大量的仪器、设备,投入相应的人力、物力,而且具有一定的危险性。因此,若能在充分认识固体推进剂各性能的主要影响因素及其作用机理的基础上,建立起相应的物理模型和数学模型,借助电子计算机进行各项性能预估,且能保证相当的预估精度,则不失为一种简单、快速、经济、有效的方法。所以近数十年来,各国推进剂性能研究工作者一直致力于固体推进剂各项性能的理论计算研究。这也是本书探讨的主要内容。

§ 1.2 固体推进剂性能计算发展现状

一、固体推进剂能量性能计算

前已述及,无论哪类固体推进剂,其释放能量、能量转换过程均是一个基本相同的、简单的热功转换过程。利用热力学定律及有关的化学热力学关系,在一定的假设条件下,可以比较容易地计算出固体推进剂能量性能各表征参数。实际上,在应用能量守恒方程和质量守恒方程的前提下,固体推进剂能量性能计算的核心问题就归结到如何求解恒定温度和恒定压强条件下固体推进剂燃烧产物的平衡组成问题。由这个问题求解方法的不同,衍生出两类推进剂能量性能计算方法,即平衡常数法和最小自由能法。总的来看,由于固体推进剂能量性能理论计算对象比较简单,易于求解,因而其发展也较为成熟。

二、固体推进剂燃烧性能计算

由于固体推进剂燃烧的复杂性,以及推进剂种类、组分种类和含量等方面的差异,造成其燃烧过程的巨大差异。想要建立一种通用的、普适性强的推进剂燃烧模型近乎是不可能的。现有的固体推进剂可分为均质的双基推进剂和非均质的复合推进剂两大

类，两者燃烧过程迥然不同。由于双基推进剂的物理结构是均质的，所以燃烧火焰显示均匀和一维的表象，其燃烧波结构由凝聚相反应区、嘶嘶区、暗区和发光火焰区等几个主要区域构成。

复合推进剂的物理结构是非均质的，所以其燃烧波结构，尤其是其燃面及燃面附近的气相反应区域呈现异相的表象。在燃面上，氧化剂颗粒上方具有明显的单元推进剂预混火焰，而粘合剂热分解产物与其它燃料组分在氧化剂单元推进剂火焰周围相互扩散，产生扩散火焰。因此，复合推进剂火焰结构是复杂的，并局部呈现三维特征。显而易见，复合推进剂燃烧模型较均质的双基推进剂燃烧模型更为复杂。

除此以外，复合改性双基（CMDB）推进剂、硝胺推进剂乃至 NEPE 推进剂、超高燃速推进剂（发泡造成的对流燃烧类）等其它推进剂种类，由于主要组分或物理结构的差异，其燃烧过程也与前面讨论的两种推进剂不尽相同，因此其燃烧模型也有所差别。

除燃烧机理不同之外，由于燃烧过程中存在化学反应速度与扩散速度间的相互竞争作用，以及推进剂实际燃烧过程中某些特征参数（如反应速度常数、反应级数、各组分和燃烧产物的扩散系数等）的不可测性导致固体推进剂燃烧模型的建立及数值计算变得非常复杂，而且困难重重。目前固体推进剂燃烧性能计算中，上述某些无法测得的参数只能近似采用其它相应的数据，或者通过与实测推进剂燃烧性能的比较回归出某些参数值。因而，严格地讲，目前固体推进剂燃烧性能的计算并不具备真正的理论计算条件，而应称为固体推进剂燃烧性能的模拟计算。

对复合固体推进剂的力学性能而言，人们希望能够根据推进剂制造过程中的药浆粘度、推进剂配方、固化剂及交联剂的种类和含量来预估出固化后推进剂的力学性能。同样，人们还希望由未老化的推进剂力学性能结合其贮存过程中的老化机理，预示推进剂力学性能贮存过程中的变化情况，确定贮存期。但遗憾的是，

由于这方面研究不够，目前尚无法完成人们所期望的任务。

§ 1.3 固体推进剂性能计算的一般过程

对固体推进剂某一性能或变化过程的模拟计算，或者说固体推进剂某一性能表征参数的理论计算，必须依据一个能真实反映其变化规律的模型来进行。而这种模型的建立，则有赖于对某一变化过程深层次的机理性认识。固体推进剂性能计算的一般过程可用图 1-3 表示。

实验研究 → 实验数据、现象分析 → 作用机理研究 → 建立物理模型 → 建立数学模型 → 数值计算

图 1-3 固体推进剂性能计算的一般过程

由图 1-3 可以看出，固体推进剂性能计算过程可分为实验基础研究、建立模型和性能计算三个步骤。

实验研究的目的在于揭示某一变化过程的本质。以固体推进剂燃烧性能模拟计算研究为例，为了使建立的燃烧模型能够反映推进剂的燃烧过程，就需进行大量的实验研究工作，如需对固体推进剂燃烧波的结构，凝聚相和气相反应区的化学反应动力学以及反应机理等方面进行大量、细致的实验工作。然后对实验数据、结果进行分析，经过由表及里、去伪存真、去粗取精的工作，区分出影响固体推进剂燃烧性能的主要因素和次要因素，进而找出那些主要影响因素的作用规律，为建立固体推进剂燃烧的物理模型打下坚实可靠的基础。

奠定了可靠的实验基础，就可以建立反映某一变化过程的物理模型。对固体推进剂燃烧而言，提出的物理模型应该包括燃烧波的结构、各区域的主要化学反应机理、整个固体推进剂燃烧区域的温度分布、能量平衡以及气相火焰区的质量传递、能量传递