



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

火炮发射装药设计 原理与技术

Principle and Technique for Gun Propellant Charge Design

王泽山 何卫东 徐复铭 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

火炮发射装药设计 原理与技术



王泽山 何卫东 徐复铭 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是一部论述火药装药学理论基础的著作。内容有火药装药设计的理论基础、火药气体的热力学性质、装药的弹道性能、装药的弹道设计与结构设计,以及最新发展的装药技术和模拟检测技术等。

本书可以作为军工行业研究机构、工厂和靶场等技术人员的参考书,亦可作为高等院校军工专业研究生的教学参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

火炮发射装药设计原理与技术/王泽山,何卫东,徐复铭编著. —北京:北京理工大学出版社,2014.2

(现代兵器火力系统丛书)

国家出版基金项目及“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5640-8702-9

I. ①火… II. ①王…②何…③徐… III. ①火炮-发射装药-装药设计 IV. ①TJ3②TJ410.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第020663号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)
82562903(教材售后服务热线)
68948351(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京地大天成印务有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/23.25

字 数/430千字

版 次/2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷

定 价/88.00元

责任编辑/樊红亮

王玲玲

文案编辑/王玲玲

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

现代兵器火力系统丛书

编 委 会

主 任 王兴治

副主任 王泽山 朵英贤

编 委 (按姓氏笔画排序)

王亚平 王志军 王保国 尹建平 冯顺山

吕春绪 刘吉平 肖忠良 张 合 张小兵

张相炎 陈国光 林 杰 欧育湘 金志明

周长省 胡双启 姜春兰 徐 诚 谈乐斌

董素荣 韩子鹏 韩 峰 蔡婷婷 樊红亮

总 序

国防科技工业是国家战略性产业，是先进制造业的重要组成部分，是国家创新体系的一支重要力量。为适应不同历史时期的国际形势对我国国防力量提出的要求，国防科技工业秉承自主创新、与时俱进的发展理念，建立了多学科交叉，多技术融合，科研、实验、生产等多部门协作的现代化国防科研生产体系。兵器科学与技术作为国防科学与技术的一个重要分支，直接关系到我国国防科技总体发展水平，并在很大程度上决定着国防科技诸多领域的成果向国防军事硬实力的转化。

进入 21 世纪以来，随着兵器发射技术、推进增程技术、精确制导技术、高效毁伤技术的不断发展，以及新概念、新原理兵器的出现，火力系统的射程、威力和命中精度均大幅提升。火力系统的技术进步将推动兵器系统的其他分支发生相应的革新，乃至促使军队的作战方式发生变化。然而，我国现有的国防科技类图书落后于相关领域的发展水平，难以适应信息时代科技人才的培养需求，更无法满足国防科技高层次人才的培养要求。因此，构建系统性、完整性和实用性兼备的国防科技类专业图书体系十分必要。

为了解决新形势下兵器科学所面临的理论、技术和工程应用等问题，王兴治院士、王泽山院士、朵英贤院士带领北京理工大学、南京理工大学、中北大学的学者编写了《现代兵器火力系统》丛书。本丛书以兵器火力系统相关学科为主线，运用系统工程的理论和方法，结合现代化战争对兵器科学技术的发展需求和科学技术进步对其发展的推动，在总结兵器火力系统相关学科专家学者取得主要成果的基础上，较全面地论述了现代兵器火力系统的学科内涵、技术领域、研制程序和运用工程，并按照兵器发射理论与技术的研究方法，分述了枪炮发射技术、火炮设计技术、弹药制造技术、引信技术、火炸药安全技术、火力控制技术等内容。

本丛书围绕“高初速、高射频、远程化、精确化和高效毁伤”的主题，梳理了近年来我国在兵器火力系统相关学科取得的重要学术理论、技术创新和工程转化等方面的成

果。这些成果优化了弹药工程与爆炸技术、特种能源工程与烟火技术、武器系统与发射技术等专业体系，缩短了我国兵器火力系统与国外的差距，提升了我国在常规兵器装备研制领域的理论水平和技术水平，为我国兵器火力系统的研发提供了技术保障和智力支持。本丛书旨在总结该领域的先进成果和发展经验，适应现代化高层次国防科技人才的培养需求，助力国防科学技术研发，形成具有我国特色的“兵器火力系统”理论与实践相结合的知识体系。

本丛书入选“十二五”国家重点出版物出版规划项目，并得到国家出版基金资助，体现了国家对兵器科学与技术，以及对《现代兵器火力系统》出版项目的高度重视。本丛书凝结了兵器领域诸多专家、学者的智慧，承载了弘扬兵器科学技术领域技术成就、创新和发展兵工科技的历史使命，对于推进我国国防科技工业的发展具有举足轻重的作用。期望这套丛书能有益于兵器科学技术领域的人才培养，有益于国防科技工业的发展。同时，希望本丛书能吸引更多的读者关心兵器科学技术发展，并积极投身于中国国防建设。

丛书编委会

前 言

本书是火药装药学的基础著作。编著过程中，作者重视知识传承、发展与创新的关系，并重视对火药装药发展动向的评述。

火药热力学性质的数学模拟理论是装药理论发展的重要内容之一，火药装药的内弹道行为，在很大程度上取决于火药燃气的热力学性质和燃气的组成。发展的数值模拟理论，其应用范围由理想气体扩大到火炮条件下的真实气体，可对高压火药燃气组成和性质进行较准确的判断，是分析弹丸在膛内运动和分析火药燃烧现象的基础。

建立在流体动力学基础上的两相流模型是内弹道流体动力学模型的代表，它和建立在热力学基础上的传统弹道模型相辅相成。

以流体动力学为基础的弹道模拟和以真实气体为基础的热力学性质数值模拟，使火药设计和弹道设计的内容更加充实，这有助于进行多因素的方案选择、因素对比和对目标的优化，简化了装药的设计过程。

发展的有关火药参数与弹道性能关系的理论描述，以及对点火系统、火药燃烧、可燃容器的理论描述，有助于分析装药各技术之间的关系。

除装药理论之外，近年的装药技术发展尤为迅速，弹道效果明显的一些装药技术已经获得应用。它们在提高初速、提高射速、增加射程、增加威力和精度等方面起到了非常重要的作用。这些装药有低温感装药、模块装药、随行装药、电热化学炮装药等。火炮远程发射的成果是身管武器发展的标志性成果。发射装药技术是远程发射系统的核心技术之一。它们包括：高初速的装药技术，火箭发动机装药技术，膛内、膛外冲压发动机装药技术，底排装药技术等，集中体现了当今先进的装药技术和装药手段。本书在EI低温感装药、随行装药、模块装药、固结装药和开槽杆状药、试验技术，以及底排、火箭增程、冲压发动机和复合增程等远程发射装药技术的基础上，充实了多层装药、模块装药、金属风暴装药、炮射导弹装药和装药试验检测等新发展的装药技术。

本书由王泽山、何卫东、徐复铭共同编著。

尽管装药理论与技术有重要的进展，但装药设计所用的大部分基础知识仍是“经验性”的，表明火药装药学的内容不够完整，处在发展之中。在这种情况下编写本书有一定难度，也会影响到本书的质量，编著者虽经多方努力，但因能力所限，书中问题和缺陷在所难免，希望读者给予指正。

编著者

2013. 07

目 录

绪论	1
0.1 火炮发射装药概述	1
0.1.1 火炮发射装药研究的内容	1
0.1.2 火药装药的技术目标	2
0.2 火炮发射装药的组成及各装药元件的作用	4
0.3 装药设计的任务和对装药的要求	5
0.4 火炮发射装药的基本类型	5
第1章 火药气体的组成和热力学性质	7
1.1 火药气体的状态方程	7
1.2 火药能量性质的简单计算方法	9
1.2.1 比容	10
1.2.2 燃气平均定容比热容	10
1.2.3 绝热火焰温度和释放能的计算	13
1.2.4 余容	15
1.2.5 爆热、火药力和其他能量示性数	16
1.2.6 无机盐 n_i 、 $\bar{c}_{V_i}$ 、 ϵ_i 的计算	17
1.3 火药气体组成的理论计算	19
1.3.1 考虑离解情况下火药气体的组成	20
1.3.2 不考虑离解情况下火药气体的组成	25
1.3.3 火药气体中 CH_4 含量的计算	26
1.4 火药燃气的热力学函数	27
1.4.1 释放能	27
1.4.2 焓	33
1.4.3 熵	34

2 火炮发射装药设计原理与技术 ■

1.4.4 比热容与比热容比	38
1.4.5 声速	38
1.5 炮口烟	39
1.5.1 未氧化碳值	39
1.5.2 理论估算方法	39
1.6 发射药的热力学性质与 BLAKE 编码	42
1.6.1 BLAKE 编码简述	42
1.6.2 各编码计算结果的符合程度	43
1.6.3 试验验证	45
1.6.4 应用实例	47
1.6.5 程序化的近期发展	50
第2章 装药参数与弹道性能	52
2.1 火药力	52
2.1.1 火药力与弹道性能的关系	52
2.1.2 制式火炮装药与火药力	53
2.1.3 新火炮装药与火药力	54
2.2 装药量	55
2.2.1 装药量与弹道诸元	55
2.2.2 弹道设计与装药量的选择	55
2.2.3 用增加装药量的办法提高火炮的初速	59
2.2.4 装药量、火药力与装药性能	59
2.3 火药的爆温与膛内火药气体温度	62
2.3.1 火药爆温	62
2.3.2 膛内火药气体的温度	63
2.4 火药的爆热和潜能	64
2.5 火药密度	65
2.6 药型和火药压力全冲量	66
2.6.1 药型	66
2.6.2 压力全冲量	67
2.6.3 χ 和 I_k 同时变化对弹道性能的影响	68
2.7 余容	69
2.7.1 余容的物理意义	69
2.7.2 余容对弹道性能的影响	69
2.7.3 影响余容的有关因素	71

2.7.4 余容的计算方法	71
第3章 火药装药在内弹道过程中的作用及其设计	73
3.1 火炮火药装药的点火和燃烧过程	73
3.1.1 装药的点火	73
3.1.2 火药的燃烧	74
3.1.3 火焰在火药装药中的传播	77
3.2 火药燃气对炮膛的热传导和烧蚀作用	79
3.2.1 传热系数和比热流	79
3.2.2 膛壁温度	80
3.2.3 总热流量	82
3.2.4 计算稳定热传递的简易方法	83
3.2.5 火药燃气对炮膛的烧蚀与防烧蚀原理	84
3.2.6 防烧蚀的有关措施	88
3.3 发射时的其他有害现象	90
3.3.1 膛口气流及其发展	91
3.3.2 炮口焰	92
3.3.3 炮口烟	93
3.3.4 炮尾焰	94
3.4 火炮发射过程的内弹道模型	95
3.4.1 经典内弹道模型	95
3.4.2 经典内弹道模型的弹道解	99
3.4.3 弹道循环分阶段考虑的内弹道模型	121
3.4.4 内弹道两相流体力学模型	131
3.4.5 高低压火炮内弹道模型的建立	137
3.4.6 身管武器膛内 $p-t(l)$ 和 $v-t(l)$ 曲线	141
3.5 火炮内弹道模型与火炮火药装药设计	145
3.5.1 火炮内弹道模型与火炮火药装药设计	145
3.5.2 火药装药设计的步骤	148
3.5.3 火药装药弹道设计的方法	152
3.5.4 变装药的弹道设计	159
3.6 火药单体形状和尺寸的选择	161
3.7 火炮火药装药弹道设计方案的评价	162
3.7.1 发射药装药弹道设计方案评价的有关标准	162
3.7.2 装药优化设计的概念	165

第4章 火炮火药装药的结构设计	167
4.1 装药结构与火炮性能	167
4.1.1 膛内压力波的产生	167
4.1.2 装药设计因素对压力波的影响	168
4.2 火炮火药装药结构	171
4.2.1 线膛火炮的装药结构	171
4.2.2 滑膛火炮的装药结构	182
4.2.3 特种发射药装药结构	186
4.3 火药装药中的点火系统	194
4.3.1 点火器件	194
4.3.2 影响点火过程的因素	197
4.3.3 装药点火系统设计的一般知识	200
4.4 火炮火药装药附加元件	206
4.4.1 护膛剂	206
4.4.2 除铜剂	210
4.4.3 消焰剂	211
4.4.4 紧塞具与密封装置	212
第5章 火炮发射药装药技术的进展	213
5.1 渐增性燃烧的装药	213
5.1.1 燃速渐增性装药	213
5.1.2 增面性燃烧装药	216
5.2 密实装药	218
5.2.1 粒状药密实技术	218
5.2.2 球形药密实技术	219
5.2.3 杆状药密实技术	221
5.2.4 压实固结装药密实技术	221
5.3 开槽杆状药	224
5.3.1 开槽杆状药的特点	224
5.3.2 开槽杆状药的密闭爆发器试验研究	225
5.3.3 开槽杆状药的装药计算过程概述	225
5.4 形成平台压力的装药结构	228
5.4.1 一种圆片状组合装药可以获得压力平台的弹道效果	228
5.4.2 多层变燃速结构形成类平台效果的技术方法	229
5.5 低温感装药技术	230

5.5.1	装药的温度系数	230
5.5.2	降低温度系数的方法	231
5.5.3	低温感发射药 EI	232
5.5.4	一种新的低温感装药技术	235
5.6	随行装药	247
5.6.1	随行装药效应	247
5.6.2	随行装药结构	249
5.6.3	随行装药数值模拟概述	250
5.6.4	试验研究	252
5.7	模块装药	256
5.7.1	模块装药的发展概况	256
5.7.2	大口径火炮用全等式模块装药和远射程装药	257
5.7.3	双模块技术	258
5.8	特高燃速装药	267
5.8.1	特高燃速发射药	267
5.8.2	特高燃速发射装药对流燃烧的内弹道效应	268
5.8.3	弹道效果	272
5.9	装药的点火技术	273
5.9.1	中心点火管	273
5.9.2	低速爆轰波 (LVD) 点火具	273
5.9.3	激光点火具	274
5.9.4	等离子体点火具	275
5.10	液体发射药装药	275
5.10.1	液体发射药	275
5.10.2	液体发射药的特征	277
5.10.3	液体发射药装药的弹道模型	280
5.11	电能与化学能结合的发射技术	282
第 6 章	远程发射装药技术	285
6.1	提高火炮初速	285
6.1.1	用增加身管长度的方法提高初速	285
6.1.2	用增大药室容积与增加膛压的方法提高初速	286
6.2	优化底排装置	287
6.3	火箭增程与 VLAP 远程弹	287
6.4	固体燃料冲压发动机装药	288

6 火炮发射装药设计原理与技术 ■

6.5 减小弹道系数,提高射程	289
6.6 增加射程技术的特点	289
6.7 超远程发射装药	291
6.8 几项增程技术的基础与进展	292
6.8.1 弹尾排气增程装药技术	292
6.8.2 利用升力增加炮弹的射程	299
6.8.3 膛内、外冲压推进技术	304
第7章 发射装药的模拟检测技术	310
7.1 装药特征的数值模拟	310
7.2 用于模拟装药燃烧性能的密闭爆发器试验	310
7.3 测定装药燃速的定容、恒压密闭爆发器试验	311
7.4 模拟火炮寿命的烧蚀性能试验	312
7.5 快速降压的燃烧中止试验	312
7.5.1 试验装置和试验过程	312
7.5.2 熄火条件	313
7.5.3 药粒尺寸变化的分析与测量	313
7.5.4 回收药粒的表面结构	314
7.6 混合装药的密闭爆发器试验	315
7.6.1 混合装药的燃烧特征	315
7.6.2 评定混合火药、钝感火药定容燃烧性能的方法	317
7.7 模拟装药内弹道性能试验	318
7.7.1 势平衡模拟检测方法	318
7.7.2 预估火炮弹道性能的小口径火炮模拟试验	318
7.8 发射装药发射安全性试验	319
7.8.1 发射装药燃烧与力学环境模拟试验方法	319
7.8.2 发射装药点传火与运动试验	321
7.8.3 发射装药动态挤压破碎及动态活度试验	322
7.9 火炮初速和膛压的测定	326
7.9.1 火炮初速的测定	326
7.9.2 火炮膛内压力测试	327
参考文献	331
索引	334

绪 论

0.1 火炮发射装药概述

0.1.1 火炮发射装药研究的内容

火炮发射装药是弹药中的火药以及装药各辅助元件的总称。经过长期的发展，火炮发射装药理论与技术（简称火药装药、装药）已经发展成为一门学科：火药装药学。它和火药学、弹丸学有密切关系，它有系统的和较完整的科学内容和科学方向。目前，火药装药技术发展很快，新原理、新概念、新结构装药不断涌现。高能量密度装药、刚性装药、随行装药、压实装药、电热化学能装药，以及缓蚀、底排、零梯度等装药技术逐步获得应用。装药技术近期的发展，促进了火炮和弹药技术的进展，也充实了装药学的科学内容。

火药装药为武器提供发射能量，它是决定武器威力的关键因素之一。火药装药应满足武器的战术、技术要求，尤其应满足武器威力的要求，为武器储备和提供必需的能量，并在发射瞬间完成能量的转换。

火药装药应在武器环境中、在武器服役和瞬间发射时准确地发挥效能。装药的可靠性、敏感性和安全性是令人关注的问题；赋予装药低易损性，是武器摧毁目标、保存自己的需求。

勤务处理和机动性有相近的意义。简化的装药、安全的装药，可在较大程度上影响到武器的机动性和人员的操作环境。

火药装药应从上述的威力、安全可靠性和勤务处理等诸多方面满足武器的战术、技术要求。火药装药的研究内容虽然很多，但主要的有三项：

- ① 满足武器威力要求，提高炮口动能；
- ② 提高武器的安全性和可靠性；
- ③ 改善武器的勤务处理环境。

其中，炮口动能和弹道稳定性是装药研究的核心内容，装药研究一直在关注增加炮口动能的理论和技術。有利于武器机动性、武器寿命的装药研究也很重要，如可燃容器、刚性装药、缓蚀技术、整装和分装式装药结构、装药工艺等，都是装药研究的主要内容，它们和武器威力有密切的关系。

装药理论是装药学的重要组成部分，近期，火药设计、装药设计、点火系统设计、弹道设计等基础理论的研究都有所进展，发展的有关理论逐步地改变装药经验和半经验

的设计方式。

0.1.2 火药装药的技术目标

火炮内弹道过程是装药潜能转变为弹丸动能的过程。内弹道过程遵循能量转换的规律，装药研究的重要基点是提高炮口动能，由于

$$\frac{1}{2} \varphi m v_0^2 = \int_0^{l_g} S p dl \quad (0-1)$$

式中， p 为火炮膛内压力，MPa； l 为弹丸的行程，m； v_0 为弹丸初速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； m 为弹丸质量，kg； φ 为次要功系数； l_g 为火炮身管总长度，m； S 为身管截面积， m^2 。

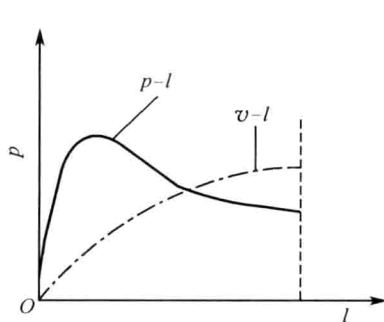


图 0-1 制式火炮 $p-l$ 曲线

炮口动能在数值上等于 $p-l$ 曲线的面积 $\int_0^{l_g} S p dl$ ，该值用符号 ∇ 表示。

下面分析提高 ∇ 的方法和可能性，从中确定装药技术所追踪的技术目标。现取身管长 l_g 、最大压力 p_m 和初速 v_0 已给定的火炮。该火炮通常的 $p-l$ 曲线如图 0-1 所示。要在 $p \leq p_m$ 的条件下增加 $p-l$ 曲线的面积，该曲线应尽快地达到最大压力，之后保持此压力至 l_g 。这种曲线称为弹道平台曲线。图 0-2 是接近弹道平台曲线的几类曲线。

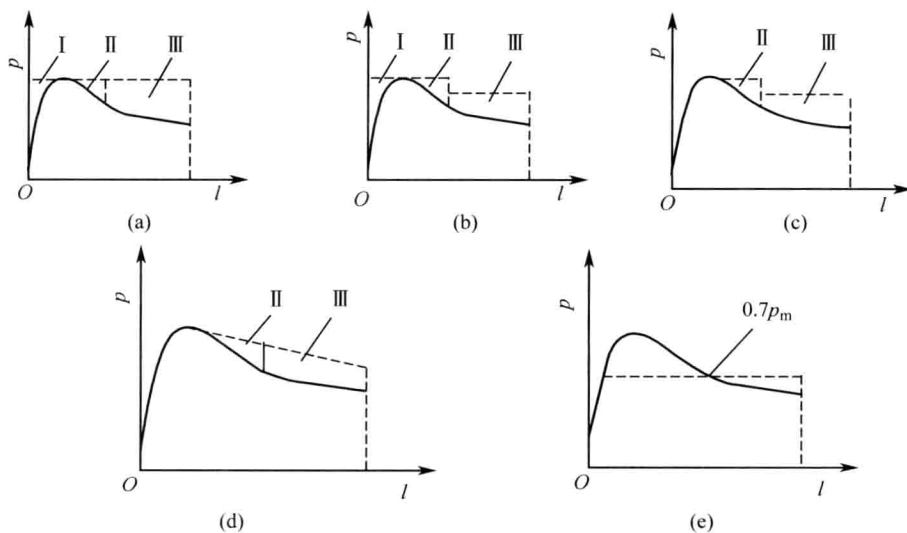


图 0-2 平台曲线类型

(a) 以 p_m 为平台压力的平台；(b) 阶梯压力平台；(c) 局部压力平台；

(d) 类平台；(e) 压力为 $0.7p_m$ 的平台

图 0-2 (a) 所示的曲线是 p_m 保持不变的弹道平台曲线 (虚线), 它从点火开始就进入最大压力, 一直保持到炮口。和原曲线相比, 面积增加 I、II、III 这 3 个部分。但炮口压力所限制, 不宜太高。所以图 0-2 (a) 曲线虽有最高的做功面积, 但没有实际应用的意义。

图 0-2 (b) 所示的曲线是有两个阶梯的平台曲线, 两个阶梯的压力比 $p_{m1}/p_{m2} = 3/2$; 行程长之比 $l_g/l_m = 3$; 此曲线的压力较接近原火炮的允许压力。

图 0-2 (c) 是在图 0-2 (b) 的基础上去掉曲线下 I 区的面积而成的两个阶梯平台曲线。

图 0-2 (d) 是在 (c) 的基础上使 p_m 缓慢下降而产生的类似平台的曲线, 其曲线所代表的压力是缓慢下降的。

图 0-2 (e) 是压力为 $0.7p_m$ 并去掉 I 区的压力平台曲线。

上述五种情况都达到了提高 ∇ 值的目的。它们分别产生的效果见表 0-1 (以某火炮装药为例)。

表 0-1 平台效应

类 型	$p-l$ 面积增加相对值/%			总增加面积 /%	理论增速 /%
	I 区	II 区	III 区		
图 0-2 (a)	9.3	6.2	117.0	132.5	52.7
图 0-2 (b)	9.3	6.2	65.0	80.5	34.4
图 0-2 (c)		6.2	65.0	71.5	30.8
图 0-2 (d)		6.2	33.0	39.2	17.9
图 0-2 (e)				52.6	23.14

在上述提高炮口动能的几种方式中, (a) 情况的增加值是火炮可能增加的极限值。(b)、(c) 的情况是在技术发展的条件下有可能实现的, 其炮口动能可提高约 80%。(d)、(e) 具有现实性, 炮口动能增加 39%~52%, 初速可提高 18%~23%。

(a)~(e) 的动能增加值都受环境温度的影响。表 0-1 所列数据是以常温为基准的数据。如果消除平台压力的温度感度, 则平台压力还可以再提高。

真正完成做功的力是弹底压力, 由于受弹后工质 (火药燃气) 声速的影响, 膛底和弹底存在较大的压力梯度。弹丸初速越大, 压力差越大, 初速损耗也越大。因此, 要考虑温度和声速的影响, 希望在各种条件下都能稳定、最大限度地提高平台效果与炮口动能。

根据以上分析, 装药研究的重要技术目标应该是获取压力平台效应、增加炮口动能。近期目标的极限值是炮口动能增加 100%。目前可能获得的类平台效应, 炮口动能可提高 40%~80%。

本书将在后续的章节, 叙述装药能量密度、气体生成规律有序控制、补偿装药、随行装药等多种技术, 以讨论获取压力平台效应、增加炮口动能的技术途径。