

(美) H. 克里尔 M. 萨默菲尔德

火炮内弹道学

華東工程學院

内 容 简 介

原著是美国航空和宇航研究院的丛书第66卷。该书在理论内弹道方面，除了对经典内弹道作了深入综合分析以外，重点阐述了近代内弹道理论，即两相流的内弹道模型。对膛内压力波的产生，点火及火焰传播现象也作了比较详细的分析。在实验内弹道方面，该书也较系统地介绍了内弹道参量测试的技术和实验装置。它不仅在内弹道理论上有一定的深度和广度，同时也综合叙述了内弹道的实践部分。并较详细的介绍了美国弹道研究实验室的概况。因此，对从事内弹道研究和教学人员，兵器设计及靶场工作的技术人员都具有比较好的参考价值。

内弹道学也是数学力学和工程热物理的一个分支，对从事这方面工作的理工科院校的师生也不失为一本较好的参考书。

H. Krier M. Summerfield

INTERIOR BALLISTICS OF GUNS

The American Institute of Aeronautics
and Astronautics 1979

火 炮 内 弹 道

[美] H·克里尔

M·萨默菲尔德

鲍廷钰 等人译

鲍廷钰 校

*

华东工程学院弹道研究所出版

1981年5月

印数： 字数：

定价： 元

66分册编著者索引

主题与作者

火炮内弹道论及简化弹道典型

Herman Krier 及 Michael J. Adams

University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill.

火炮的实用内弹道分析

Paul G. Baer

Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Md.

应用于轻武器的内弹道模型

Sidney Goldstein

U. S. Army Armament Research and Development Command

Dover, N. J.

应用于速射火炮的内弹道

Otto K. Heiney

Air Force Armament Laboratory, Eglin Air Force Base, Fla.

无后座炮内弹道的数学模型

Aivars K. Celmins

U. S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving

Ground, Md.

高初速火炮的理论

Arnold E. Seigel

University of Maryland College Park, Ma.

火炮中二相流的模型

P. S. Gough

Paul Gough Associates, Inc., Portsmouth, N. H.

装药设计的研究及其对火炮中压力波的影响

Ingo W. May and Albert W. Horst

Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Ma.

在粒状药火炮装药中的点火及火焰传播现象

J. L. East Jr.

- Naval Surface Weapons Center, Dahlgren, Va.
- 准确测量初速的相对陡度的运用
Moshe BenReuven and Martin Summerfield
Princeton University, Princeton, N.J.
- 弹道性能对火药燃烧性质的敏感度
P. Serao
U.S. Army Armament Research and Development
Command Dover, N.J.
- J. Pierce
Hercules, Inc., Radford, Va.
- 应用于火炮内弹道的研究试验技术
E. B. Fisher
Calspan Corporation, Buffalo, N.Y.
- 火炮火药
Ludwig Stiefel
Armament Research and Development Command, Dover, N.J.
- 内弹道计算的状态方程及热力学数据
E. G. Powell及G. Wilmot
U.S. Naval Surface Weapons Center, Dahlgren, Va.
- L. Haar及M. Klein
National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- 美国陆军弹道研究实验室的火炮内弹道的历史展望
Leland A. Watermeier及John M. Hurban
Ballistic Research Laboratory, U.S. Army Armament Research and
Development Command, Aberdeen Proving Ground, Md.

目 录 表

前言.....	1
---------	---

第 一 部 分

火炮内弹道论及简化弹道的典型	5
其中包括:	
弹道循环的论述.....	8
压力—行程曲线.....	12
火炮系统及装药的效率.....	15
火炮火药的论述	15
火药药粒的燃烧.....	19
药粒特性对火炮性能的影响.....	20
火炮火药的能量: 概述.....	22
弹道模型	22
状态方程.....	23
形状函数分析.....	25
燃速方程.....	25
可变容积的研究及弹丸运动.....	26
热损失影响.....	29
假设的概括.....	30
基本方程的节录.....	31
例题计算: 标准火炮火药系统.....	32
火炮的实用内弹道分析	37
其中包括:	
现有的火炮模型种类.....	37
现有模型的分类.....	38
最佳火炮模型.....	42
解决内弹道问题模型的任务	43
减少火炮压力波.....	43

火药验收试验的模拟	44
新火炮的设计	49
现有火炮性能的改进	52
子计内弹道编码对试验数据的协调	53
内弹道模型的输入数据	56
应用于轻武器的内弹道模型	65
其中包括:	
经验模型的论述	68
分析内弹道模型	70
火药的钝化技术	70
分析	71
特殊的内弹道模型	74
轻武器内弹道中的特殊课题	75
轻武器的气体传送系统	75
轻武器系统中的压力波	76
应用于远射火炮的内弹道	85
其中包括:	
内弹道模型	87
压力、密度与速度的梯度	89
炮口焰	94
对炮管的热传导	98
通过身管的热传递	102
无后座炮内弹道的数学模型	108
其中包括:	
数学模型的物理基础	109
模型的用途及局限性	109
基本假设	110
基本方程组	111
膛内流动	111
燃烧室	113
喷管的流动	115
边界条件	116
弹丸的边界条件	117
喷口的边界条件	117

药室与炮膛间的边界条件.....	118
推力计算.....	119
噪声估计.....	120
数值模型.....	121
例证: 典型结果.....	123
对模型改进的展望.....	125
高初速火炮理论.....	129
其中包括:	
高速炮的基本要求.....	130
予燃推进剂 (PP) 炮: 概述.....	131
予燃推进剂炮的说明.....	131
气体中扰动传播方程.....	132
等直径予燃推进剂炮.....	132
在等截面管道中应用等熵气体膨胀方程的复述.....	132
等效无限长药室火炮的特征线方程.....	133
声惯性的作用.....	134
在予燃推进剂等熵气体 (PPIG) 火炮推动弹丸运动的方程.....	136
有限长药室火炮.....	137
具有药室的 PPIG 炮中弹丸性能的数值计算结果.....	142
在身管中弹丸前面的气体影响.....	144
等熵理论对火炮的适用性.....	145
加热推进剂炮的实验结果.....	145
非等熵影响的分析研究.....	146
加热推进剂的方法.....	147
两级火炮.....	148
恒压炮.....	151
推进剂气体的非理想性对予燃推进剂炮性能的影响.....	153
提供增加弹丸速度的方案.....	155

第 二 部 分

火炮中两相流的模型.....	168
其中包括:	
物理问题及模型的性质.....	171
理论与实验之间的符合.....	173
不均匀两相流的平衡方程.....	174

封闭及结构定律.....	180
平衡方程的结构.....	182
解的方法.....	183
装药设计的研究及其对火炮中压力波的影响.....	189
其中包括:	
压力波现象.....	190
实验研究.....	193
装药设计因素对压力波的影响.....	195
点火激发.....	195
质量燃烧速度.....	200
渗透性.....	202
药室和装药的几何性.....	206
可靠的火炮点火.....	210
在粒状药火炮装药中的点火及火焰传播现象.....	220
其中包括:	
点火剂和火药之间的反应.....	223
轻武器系统.....	224
大口径火炮.....	226

第 三 部 分

相对陡度应用初速的精确测量.....	236
其中包括:	
灵敏度研究.....	240
影响系数数据举例和与初速数据的比较.....	241
应用密闭爆发器内燃烧试验预测初速MV的方法.....	243
弹道性能对火药燃烧性质的敏感度.....	249
其中包括:	
实验方案.....	250
密闭爆发器分析.....	251
MGMP f/175毫米总的实验方案.....	252
两两实验计划.....	254
加工及试验.....	254
MIMP f/155毫米的实验方案.....	260

长度变化的研究.....	260
药厚变化的研究.....	261
予測方法.....	265
密閉爆發器研究.....	265
数学模型的研究.....	266
模型の描述.....	266
予測結果和实验結果の比較.....	270
应用于火炮内弹道的研究试验技术.....	273
其中包括:	
测试设备.....	274
压力测量.....	274
热敏元件.....	276
光学技术.....	277
弹丸速度及行程.....	278
挤进力和炮膛的摩擦力.....	281
研究设备与技术.....	282
部件试验.....	283
点火传火试验的试验装置.....	284
排气药室.....	286
火炮和弹道模拟器.....	288
代用炮尾装置.....	289
检测液体发射药火炮 (LPG) 的试验装置.....	291

第 四 部 分

火炮火药.....	297
其中包括:	
背景.....	297
制造过程.....	297
火药领域里所用的常见术语.....	298
化学组成.....	299
制式火药.....	299
发展的火药.....	299
热化学.....	302
燃烧速率.....	304
測量.....	304

改变温度的影响	305
与火焰温度的关系	305
钝化火药的燃烧速率	305
燃蚀的及动力的燃烧	306
物理性质	306
装药设计的根据	307
可燃性及安全性	307

内弹道计算的状态方程及热力学数据 317

其中包括:

用于弹道计算的状态方程	319
理论的探讨	322
物理参数的推导	325
纯 H_2O 及热水	326
CO_2 ; N_2 ; CO ; H_2	327
H_2O/CO_2 相互作用第二维里系数	328
与截短的维里方程比较: 纯水	329
附录A: H_2O , CO_2 , N_2 , CO , H_2 组成的混合物特性的计算概要	331
附录B: 哈尔—申克尔(Haar—Shenker)状态方程的 亥姆霍兹能计算概要	332

第五部分

美国陆军弹道研究实验室的火炮内弹道的历史展望 339

其中包括:

从1919年到现在, 研究和发展活动的最主要部分	340
火炮弹道的实验技术及设备的总结	353
尚需解决的现代技术空白及弹道问题的远景	358

前 言

在计划编写“宇航学及航空学的发展”丛书中的这一新分册时，编者受到这样的现实情况所鼓励，即在过去三十年，特别是在1970年的后十年，火炮内弹道科学虽然获得了显著的发展，但仍然没有成体系的教科书或总结最新成就的专著以适应要进入这个领域的初学者或希望研究其中一些特殊细节问题的专家的需要。应用最广泛而有理论水平的著作就是物理化学家康纳教授(J. Corner)的“火炮内弹道理论”。(John Wiley and Sons, New York, 1950年出版)和亨特(F. R. W. Hunt)的“内弹道学”，(His Majesty's Printing Office, London, 1951年出版)。这两本著作都是亨特、康纳及其同事在第二次大战期间所完成研究工作的自然成果。以后，于1965年又出现西格尔(A. E. Seigel)的“高速火炮的理论”，是由北大西洋公约组织(NATO)航空研究发展顾问团在巴黎出版，但此书主要地限于应用近二十年可压缩流体理论发展的内弹道气体动力学。在苏联谢烈柏梁可夫(M. E. Serebrykov)所著的“身管武器及固体火药火箭的内弹道”，由莫斯科的科学技术出版社出版，1942年初版。1949年再版，1962年又第三次出修订版。(在美国是用国家技术情报局的英译本)。此书能够起到教科书的作用，但科学的深度有限。从现代发展的眼光来看，无论如何这四种著作都远远地满足不了现有的知识水平，科学进展的步伐已经很快。情况也的确是这样，在本书中好多涉及火炮的性能问题和反常的情况，而这些内容在1970年以前就不可能进行定量的讨论。

康纳及亨特的著作是在近代高速，高容量的计算机出现之前编著的，所以书中的理论方法在处理流体流动和燃烧的过程必然带有严重的近似性，谢烈柏梁可夫的著作实质上具有相同的水平，西格尔的著作则主要地单纯着眼于内弹道气动方向，而没有考虑到固体火药的存在。在本书中将表明在过去十年已有三个因素引进了内弹道理论。而每一因素又正来源于与内弹道无关的科学分支，首要的因素就是对固体火药燃烧机理的周密处理，特别是包含在燃烧循环起点的点火和火焰传播相并联系到非定常的气流，所有这些处理在火箭领域里已达到发展的先进水平。其次就是建立表达二相间相互作用的适当关系的两相流中的流体动力方程。第三则是有可能结合前两个因素应用先进的计算机解出描述在固体药粒燃烧中同时进行的二相流系统的偏微分方程。内弹道理论增加了两相流理论及燃烧理论，对于弹道学家而言，已带来了新的见解以及预示和判别的能力。

如将新的内弹道科学名称加以修正以反映出所增添的部分，则似乎可以恰当地称之为膛内燃烧弹道。这方面的历史发展，先驱工作就是普列斯顿大学的高(Kuo)，委内迈斯基(Vichnevetsky)，及萨默菲尔德(Summerfield)所写的论文题目为“密闭情况下多孔性火药装药中的火焰阵面传播理论”。此文首先是作为高(K. K. Kuo)的博士论文发表，

然后在1973年3月刊登在AIAA期刊上，文中表明有可能准确地导出如斯奎尔(W. Squire)和迪瓦因(M. P. Devine)在法兰克福兵工厂所测出的那样在密集火药床中压力波的轮廓。这种理论的显著成就其中包含预示燃烧波中的“区段分界，”已开创了新的科学，即膛内燃烧弹道。

我们似乎可以认为未来的内弹道理论仍然会有很大的变化，这种变化可能就是燃烧过程公式化的改进。如现在这样详细的内弹道中所描述的燃烧还受到缺乏膛腔中流动状态的火药烧蚀知识和缺乏动力燃烧速度知识的限制。我们仍然不知道生成气体是象现代理论所假定的那样确实属于完全燃烧并在流场中实质上是化学惰性，还是仍然继续反应并不是化学惰性。有些确证表明硝化棉固体火药的气体火焰具有相对缓慢的化学反应(它的特性还没有确定)，而且还表明“后燃作用”(After burning)可能在燃烧室中和膛底具有主要意义。因此，膛内燃烧弹道的科学还远远地没有完善。对此，我们可以补充地说，在我们面前还有一些很大的包括有复杂的流体流动过程的研究任务；例如火焰散佈和流动过程的多元性，紊流的组合，以及将它们转化为可应用的有效的计算机程序仍然都是要实现的目标。

虽然内弹道研究还继续活跃地进行着，但本书仍然收集了编者认为有理由由现在发表的多种新的领域。在安排本书内容时我们考虑后决定，新的内容不应充分地综合，除非现在已认为以前所用分析方法最好的论文，还有就是附加的论文如火药特性，燃烧热化学，膛内流动的流体动力学，内弹道研究的试验方法，以及对典型的近代火炮内弹道方法的应用。这样本书的内容就比较广泛并具有现代内弹道教材的性质，以适应高等教育的目的。本书还列出一千多的参考注释对内弹道领域作出的独特的贡献以便于从事实际发展的工程师及从事研究的科学家的需要。

明确了作为教科书来组织编写这本书时，首先安排的内容自然是从物理及流体力学的原理所发展的对象，然后就是将所形成的简化分析应用于实际的火炮工程。因此，目录中的第一部分是克里尔(Krier)和亚当姆斯(Adams)编写的作为火炮内弹道的引言，并提供了简化弹道典型何以能够发展的基础。对大口径火炮预计的压力和弹丸速度随时间的变化同其他模型以及实验观测相比较。贝尔(Baer)所写的部分注意到在准确预示弹道性能方面如何应用各内弹道模型从而提供了内弹道模型的技巧水平。贝尔还概括了内弹道研究中七十个问题的参考文献。戈尔茨坦(Goldstein)也评论了弹道模型的应用，但侧重于小口径武器系统。在第四部分海奈(Heiney)详细地发展了一种工程内弹道模型，其中包括高射速火炮的因素。提供了计及弹丸后面速度梯度和热传导损失的新方法。这一组的最后部分是塞尔明斯(Celmins)编写的一种发展的无后座炮内弹道模型，它对经过炮膛及膛线后端的超音速喷管的非定常流的气体动力学提供了详细的分析。

第二组的四个部分使读者进入了更先进而详细的内弹道领域，首先是西格尔(Seigel)评述了火炮中的一元可压缩流体理论并导出弹丸初速的唯一极限，它提供了获得超高速的新方法并提出获得这类高火炮性能的研究范围。在这一部分注释了一百多种的参考文献。由高夫(Gough)编写的第二部分代表了上述新领域的一种类型，我们曾用膛内燃烧弹道的名称来表达它。虽然在燃烧科学范围内点火是属于火焰产生而不再存在的特殊情况，但随着固体火药的点火和燃烧的两相非定常可压缩的流动方程仍用来模拟火炮的起动机(火炮工程师

有时称之为点火相)问题。高夫的模型(Gough's model)包含有底火和火药相互接触的影响,也就是有时所谓装药结构的影响。除了所需要组成的关系式之外,还强调了流体动力学守恒方程的结构,并讨论了数值解法。文中还给出处理此问题的其他先进的两相流公式化的参考文献。

梅(May)及霍斯特(Horst)编写了本组的第二篇论文,他们根据内弹道的理论模型论述了点火时在火炮装药及火焰传播相中压力波的实验证据,他们的研究表明这种压力波不仅会改变最终的弹丸初速,并提供了理论上的性能预测甚至可以预示出炮后焰,弹头早爆或药室的破坏。由伊斯特(East)编写的这一组最后一篇论文论述了获得火炮装药的点火资料所进行的实验研究,其中特别着重于火焰传播及初始流动的过程。他总结出在一种火炮推进系统中即使具有功能满意的点火系统,但在明显的类似系统中也可能失败,而认为这是控制火药反应和弹丸运动之间关系的各参数的临界平衡被破坏的结果。

再下面两篇论文是讨论用于火炮所制造的火药的质量保证和质量控制。虽然对生成物进行严格的物理化学分析来控制火药的制造过程似乎是理所当然的,但还有较好的方法就是应用有效的燃烧试验来检验生成物,因为这种测量更接近于火药所假定的实际性能。这方面内弹道理论就是指导。

在第一篇论文中,拜努凡(BenReuven)及萨默菲尔德(Summerfield)表明特定火药所给出的初速理论上与一系列的因素有关,而这些因素又是能够直接测量而不需要在火炮中对火药进行射击试验。这种因素的分类是以能够计量的敏感度系数的组合来加以描述,其中最重要的试验因素就是在密闭燃烧器中易于测量的相对最大压力和相对陡度。塞拉(Serao)及皮尔斯(Pierce)在他们的论文中总结了应用特别制备的不正规的火药样品在密闭燃烧器中试验系统的实验计划,用来估计火炮初速随火药性能变动的敏感度。他们所以要进行这种研究工作,是因为他们想要找到可靠而有选择性的预示弹道性能的技术以代替新制火药所要进行的实际靶场射击试验。这两篇论文一起提供了保证质量的定量和理论上认为正确的基本依据。

内弹道中的理论工作必需要内弹道测试的支持。目前初速以及药室和炮膛中的压力的测定是比较容易的,但是为了测定各种内弹道模型还需要更详尽的资料。这种测试工作因高压,高温、速度迅速变化以及强冲击和强震动的严格条件造成特别的困难。费歌(Fisher)所写的论文不仅叙述了标准的技术,而且还叙述了近代内弹道研究所用的一些重要的研究技术。论文中的重要部分就是讨论火药点火,燃烧以及弹丸在火炮中行程的试验研究所需要的仪器设备。

火药特性这个主题是处理任何内弹道学的主要内容。斯蒂菲尔(Stiefel)应用一百多种参考文献评述了火炮火药,其中包括与内弹道学家有关的历史,术语,制造过程,热化学,燃烧速率及物理性能。引起读者注意到火药特性化的领域总不是静止不变的。为了特殊的目的,经常发明了新的火药,但除此之外按照持续的理论发展,那些方面的性质对现代内弹道是主要的,这方面的理论已经很明确。斯蒂菲尔的论述既提供了直接有用资料的来源,也提供了考虑评价性能的出发点。

同火药一起,表示燃气特性的准确的内弹道理论工作也是必要的。鲍威尔(Powell),

威尔莫特 (Wilmoth), 哈尔 (Haar) 及克莱因 (Klein) 所写的论文联系了燃气分子的性质处理了高压及高温气体的非理想的状态方程。这是一个广阔的主题、对于火炮弹道学者不但重要, 而且对纯物理学家, 物理化学家, 以及多种领域中的应用科学家其重要性则更为广泛。虽然这个主题很复杂, 但鲍威耳及其同事仍使它达到内弹道应用的水平。

在这一方面, 读者可能满意地感到上述文章的序列已组成一个适宜的全貌。当然, 还有多种其他与内弹道学家有关问题的领域——如炮身传热, 炮身烧蚀, 炮口焰的抑制以及其他很多问题, 但是主要的问题似乎可以认为已经具备。然而, 编者的决定将主题的一个重要方面省略掉, 即内弹道的历史发展, 但是如果不是较详细地在可以发现很多显著进步的理论方面以及实践和经验方面来探讨内弹道的进展, 也就不可能对作为应用科学的内弹道范畴进行评价。

为此目的, 编者邀请美国陆军阿伯汀靶场弹道研究实验室的沃特迈耶 (Watermeier) 及赫尔本 (Hurban) 主写这一类的评论。本书中最后的这篇论文有选择地利用在这个领域中他们的长期专业经验着重地对弹道研究试验室 (BRL) 的内弹道研究及发展作出历史的解说。此文回顾到第一次世界大战时期并在各方面进行评述——直到现在。虽然有人想要概括美国内弹道实验室之外如海军, 私人企业以及国外实验室的重要研究工作的评述。但应立刻承认这并不是件轻而易举的事。这部分是作为整个单行本的形式进行编写, 然而实际上 BRL 的科学史同二十世纪中内弹道的整个科学史密切并行的。在 BRL 的存在时期内它钻研了很重要的内弹道问题并且还要继续这样做。所以本篇尽量努力做到以狭窄的范围来达到我们的目的。为了对读者提供进入这个领域中的广阔道路, 沃特迈耶和赫尔本对本文附加了一系列反映其他研究和发展单位工作的读物。本文中还注释了 150 种以上的参考文献, 将这个领域的范围和它的历史发展表达得异常详细。

编者根据内弹道的发展提供了这本书, 相信它将作为有用的教科书而能将研究人员及其他人引导到具有传统基础的一种重要科学的现代化方向。我们还相信对于在这个领域中工作并想要在一些特殊专题中达到新成就的人来讲, 本书能够作为有用的参考书。编者感谢 AIAA 科学出版局的负责人布鲁安斯女士 (Miss Ruth F. Bryans) 的熟练的专业工作, 她同我们具有同样的耐心, 此外还感谢她的协作者, 丛书的总编辑布莱南夫人 (Mrs. Norma J. Brennan) 的工作。最后我们也非常感谢各执笔人使我们如此广泛地应用他们的专长, 对这个工作他们化了很多的时间和精力, 并且在整个工作过程中都乐意地同我们进行合作。我们希望最终他们将接受未来很多应用本书读者们的感谢作为对他们充份的回报。

Herman Krier

Martin Summerfield

1979年3月

火炮内弹道导论和简化弹道的典型

赫尔曼·克里尔^①迈克尔·丁·亚当姆斯^②

伊利诺斯大学

内 容 提 要

本世纪内，火炮内弹道的知识正如本书其它各章所述，已经取得了相当大的进展。本章是在尽可能多的简化基础上来阐述火炮内弹道的基本物理本质。因此，确定从火炮发射的弹丸速度的各主要因素，可以简单地将牛顿的力学方程应用到弹丸上而获得。但是，在以毫秒计的时间内准确地描述这些相当大的力，并不是件如此简单的事，而需要许多未经验证的假定。本文取155毫米M113加农炮的弹丸速度和压力与时间关系的计算值和其它弹道模型以及实际火炮的射击结果加以比较。

符 号 术 语

- a_1 : 弹丸的轴向加速度 呎/秒²
- A_1 : 表面面积 吋²
- A_s : 炮管的横截面积 吋²
- B : 燃烧速率系数 吋/秒 (磅/吋²)^h
- c : 装药量 磅
- C' : 辐射系数
- C_f : 滑动摩擦系数
- C_p : 等压比热 Btu/磅一度 (°R)
- C_v : 等容比热 Btu/磅一度 (°R)
- E : 热辐射系数
- E_1 : 发射药燃烧总能量 吋—磅力

^①航空和航天工程系教授

^②爱德华空军基地 (加利福尼亚州) 空军火箭推进剂实验室, 现代物理学家。

- E_2 : 弹丸移动能 吋—磅力
 E_3 : 对膛壁的热损失 吋—磅力
 E_4 : 未燃发射药和气体的动能 吋—磅力
 e_b : 弹道效率
 e_p : 示压效率
 F_D : 弹丸的总阻力 磅力
 $F_{D\text{MAX}}$: 最大挤进力 磅力
 F_R : 垂直于阳线的总摩擦力 磅力
 G : 发射药气体在固体表面上的质量速度 磅/秒—吋²
 g_c : 单位转换因子 磅—呎/磅力—秒²
 I : 轴向惯性矩 磅力—秒²—呎
 K : 热传导系数 磅—吋³—度 (°R)
 k : 转动常数
 M_E : 有效质量 磅
 N : 单位重量的分子数 磅—分子数/磅
 n' : 气体质量 磅
 n : 燃烧速度指数
 P_A : 发射药气体的平均压力 磅力/吋²
 P_B : 弹底压力 磅力/吋²
 P_{BR} : 膛 (药室) 压 磅力/吋²
 \bar{P}_{BR} : 无量纲的膛压
 P_E : 弹带挤进部分 呎
 P_{max} : 在密闭爆发器中所达到的最大压力 磅/吋²
 q_r : 辐射热 Btu
 q_c : 传导热 Btu
 \bar{R} : 通用气体常数 磅力—呎/磅分子—度°
 R : 特定气体常数 磅力—呎/磅—度°
 R' : 弹丸的有效半径 (包括弹带) 呎
 RF : 相对最大压力
 RQ : 相对陡度
 S_s, S_p : t 时间的弹丸行程 吋
 S_x : 药粒的瞬时表面积 吋²
 T_1, T_2 : 绝对温度 度°
 T_{st} : 定容火焰温度 度°
 V_c : 密闭爆发器的药室容积 吋³
 $V_c(t)$: 任一时间 t 的火炮系统的药室容积 吋³

$V_T(t)$: 任一时间 t 的火炮系统的总容积 吋³

V_g, V : 气体体积 吋³

V_{gr} : 任一时间 t 的药粒体积 吋³

V_{oet} : 起始即未装药的药室容积 吋³

V_{0s} : 弹丸初速 呎/秒

V_{0s} : 起始药粒体积 吋³

\bar{V}_s : 无量纲的弹丸初速

w : 弹丸的角加速度

W_{0B} : 弹带的宽度 呎

W_S : 弹丸重量 磅

X, x : 药粒燃烧渐减的线性距离 吋

Z : 在时间 t , 发射药烧完的分数

Z_d : 挤进常数 磅力/呎³

Z_0 : 弹丸的起始撞击力

Z_m : 挤进常数 磅力/呎³

α : 固相的热扩散率 呎²/秒

β : 热损失调节因子

δ : 导带深度 呎

γ : 绝热指数

η : 气体余容 吋³/磅

ρ_g : 发射药气体密度 磅/吋³

ρ_s : 固体发射药密度 磅/吋³

λ : 火药力 磅力—吋/磅

θ : 糙度 度

Φ : 动态燃烧率系数

I. 序 言

在任何火炮中都存在着一些固定的和可变的因素从根本上决定着火炮的性能。固定的因素主要是来源于火炮的本身,例如身管的长度、直径,药室的形状和容积等等。可变的因素一般都和弹药,弹重和发射药有关。然而,在固定的和可变的因素之间也存在着一定程度的联系,例如,药包装填的发射药和弹丸都必须符合于一定的药室形状,因此发射药囊和弹丸在尺寸上都受到限制,而具有固定的意义。又如,弹丸本身必须适应所指定的外径,要改变弹重就必须同时改变长度或质量。显然,为了获得较高的初速,较轻的弹丸所具有的潜力较大。然而,当弹丸尺寸选定以后,弹丸后面的火药所占容积即受到限制,而剩下的只有火药的燃烧可以变动。