

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

高等内弹道学

Advanced Interior Ballistics

金志明 翁春生 著

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

高等内弹道学

Advanced Interior Ballistics

金志明 翁春生 著

高等教育出版社

内 容 简 介

本书以反应两相流体力学为基础,阐述枪炮内弹道循环及其规律性,着重讨论高等内弹道学的理论、试验、数值计算方法及其在武器系统设计中的应用,其中膛内压力波现象是本书重要的研究内容。本书对液体发射药火炮、电磁炮、电热化学炮和冲压加速发射等一些非常规新概念火炮的内弹道理论也作了系统的讨论。另外,还包括点传火、装药安全性评估和随机内弹道学等章节。

本书可作为弹道专业研究生的教材,也可以作为火炮、弹丸、引信、火药、工程热物理、热能工程以及航空航天等领域的高校教师和研究生的参考书,并可供从事武器弹药科研、生产及试验的工程技术人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

高等内弹道学/金志明,翁春生著. —北京:高等教育出版社,2003.12

ISBN 7-04-013094-7

I. 高… II. ①金…②翁… III. 内弹道学—研究生—教材 IV. 0315

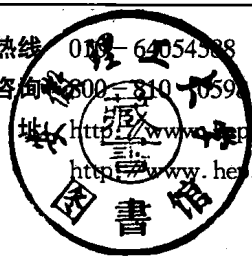
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 091994 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京人卫印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 35
字 数 590 000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>



版 次 2003年12月第1版
印 次 2003年12月第1次印刷
定 价 59.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

序

《现代内弹道学》自1992年出版以来,已经历了十个春秋。在这十年的教学实践中,该教材对研究生在有关兵器设计理论基础方面的培养,起到了良好的效果。它系统地向学生传授了以两相反应流体力学为基础的现代内弹道学理论及其在兵器系统设计中的应用,使他们在传统的经典内弹道学的基础上得到了提高,开拓了新的研究领域,以适应未来从事兵器研究设计工作的需要。原教材于1995年获部优秀教材一等奖和1997年国家教学成果二等奖。

在过去的十年中,现代内弹道学理论日臻成熟。以往在现代内弹道学中仅局限于多相无粘流的研究,对粘性流与湍流的研究却比较少。近期来对两相湍流理论在内弹道学中的应用已引起弹道学者的兴趣,并在液体发射药火炮气液两相流中获得成功的应用。这十年中,反应两相流内弹道的数值模拟也有很大的进展。过去只局限于一维和二维的数值计算,而现在多维两相内弹道问题的数值模拟及其计算程序也常见于公开发表的文献中。现代内弹道学理论在装药设计安全性评估中的应用已积累了不少高学术水平和应用价值较高的资料。应特别指出的是,现代内弹道学在一些非常规新概念火炮内弹道中的应用也取得了令人瞩目的成果,如液体发射药火炮(LPG)的气液两相流内弹道数学模型和包括等离子体的电热化学炮(ETCG)的两相流内弹道数学模型。随着军事科学技术的发展,特别在高科技作战条件下,未来战场上的兵器,其作战性能将有显著的变化。目前一些常规概念上的兵器难以满足未来作战的需要。因此,对一些非常规的新概念兵器的探索已引起兵器科学家们的十分关注。在过去的十年中,从事兵器设计的专家们提出了众多的新概念、新能源火炮发射技术,如液体发射药火炮、电热化学炮、电磁炮(EMG)和冲压加速推进(RAM)等。以上的这些研究成果为本书的修订提供了很多有价值的科学资料。综上所述,根据本学科的发展和研究生教学的需要,有必要而且也有充分的条件对《现代内弹道学》进行一次修订和充实。根据国务院学位委员会学科评议组专家的修改意见,删去某些陈旧的内容,增加近期发展起来而较为成熟的新内容,保留原书中作者认为有价值的部分,力求在理论体系和内容方面有所创新。

修订后的《现代内弹道学》更名为《高等内弹道学》,其内容共分十三

章。第一章为枪炮内弹道循环与膛内压力波。通过对内弹道循环中射击现象的分析,着重讨论膛内压力波产生的机理、影响压力波的因素和抑制压力波的技术途径。第二章为火药颗粒床挤压和破碎的力学现象。火药颗粒床的挤压和药粒的破碎,不仅影响到内弹道的过程,也是形成危险压力波的重要原因,并直接影响到装药射击安全性。前两章是研究两相流内弹道的物理基础。第三章为反应两相流内弹道理论基础。以反应两相流体力学为基础,建立起描述内弹道循环的平衡方程系。然后,根据两相物质的物理化学特征及两相间的质量、动量和能量的运输条件构造出必要的辅助方程,组成一个封闭的方程系。第四章为高密实火药床燃烧转爆轰。阐述火药床两相燃烧转爆轰理论、实验方法、数学模型和数值方法。第五章为反应两相流内弹道模型的数值模拟。根据两相流内弹道数学模型,采用近代的数值分析方法讨论内弹道方程组的数值计算方法以及不同装药结构条件下的初始和边界条件。根据一些典型的火炮装药结构,对内弹道参量随时间和空间的变化规律以及压力波进行数值模拟。第六章为火药床点火与传火。射击初期的点火和传火问题,这是高等内弹道学研究的另一个重要内容。它涉及在高密实火药床条件下,两相传热和燃烧所引起的火焰波、压力波以及由火药床挤压而产生的应力波的传播。点火和传火是整个射击过程中最复杂的一个阶段,也是影响内弹道性能稳定的一个重要因素。第七章至第十一章,分别讨论轻气炮、液体发射药火炮、电磁炮、电热化学炮以及冲压加速推进等高速和超高速推进技术与理论。详细地阐述高等内弹道学理论在该领域中的发展及应用,其中涉及液体发射药火炮的气液两相流内弹道问题和包括等离子体的电热化学炮两相流内弹道问题。第十二章为装药安全性评估。应用压力波理论分析火炮膛炸的机理和膛炸的模式。在压力波安全性评估的基础上,讨论装药设计安全性的评估方法和实施规程。这是高等内弹道学在装药设计工程中的重要应用,它涉及高性能火炮设计中的膛炸问题。第十三章为内弹道循环随机模拟。它是内弹道学中一个新的分支学科。膛内射击过程实际上是一个随机过程,如初速和膛压的散布、膛炸概率等现象只能用随机理论才能得到解释。

《高等内弹道学》保留了原书的基本框架和主要内容,删去了经典内弹道学和准两相流内弹道部分,加强和充实了高等内弹道学近年来新发展的理论和应用部分。在系统性、逻辑性和语言表述等方面做了力所能及的润色。尤其是在高等内弹道学在非常规新概念火炮内弹道中的发展及应用方面,本书收录了作者近期的研究成果和国内外弹道学者在公开文献中发表的有关资料。一些新内容的编入,使教材增色不少,达到修旧

如新的效果。由于作者水平有限,修订后的教材还会存在某些缺点,望读者指正。

本书得以顺利地完成,首先是由于教育部门的大力支持和帮助,同时也由于本书的合作者,年轻的博士生导师,我的同事翁春生博士的通力合作。在此对他的博学多才和高度的敬业精神表示由衷的敬意。同时,对远在大洋彼岸的高级研究员宋明博士表示感谢。他天资敏悟、博学强识和人格上的崇高,至今仍给我留下深刻的印象和美好的回忆。

本书第一、二、六章至第十、十二章和第十三章由金志明教授负责编写,第三、四、五章和第十一章由翁春生博士负责编写。

金志明

2002年冬于南京理工大学

主要符号表

A	膛腔截面积	$2e_1$	火药厚度
A_G, A_P	分别为气相、固相所占 据的控制体外边界面积	F_M	Lorentz 力
A_D	喷口面积	f	火药力
A_C	燃烧室截面积	f_0	主频率
\bar{A}_p	火药床单位体积表面积	f_{ms}	液体阻力
a	固相声音	f_p	单位体积相间阻力
a_1	导温系数	f_s	稳态条件下单位体积相 间阻力
B	液滴形成参量; 体积模 量	$g(\lambda)$	破坏函数
Br	火药颗粒破碎度	H	总焓; 电场强度
C	体积模量系数	h	比焓; 放热系数
c	比热容; 气相声速	I_m	相电源幅值
c_V	定容比热	i	电流
c_P	定压比热	J_r	等离子体电流密度
C_D	流量系数	K	应力衰减因子; 温度膨 胀系数
D	爆轰速度; 扩散系数	Kn	Knudsen 数
D_j	喷嘴直径	k	绝热指数; 湍流脉动动 能平均值
d_L	液滴直径		
d_p	火药颗粒有效直径	k_f	气体导热系数
E	弹性模量	k_p	固相导热系数
E_f	断裂模量	L	射流未破碎长度; 导轨 长度
E_p	火药潜能; 压缩模量	Le	Lewis 数
E_0	脉冲功率源输出的总能 量	L_D	喷射孔长度
E_M	电路中所存的磁能	L'_r	导轨电感梯度
E_a	高温等离子体电枢所具 有的内能	l	弹丸行程长; 诱导爆轰 长度
e	比内能	M_p	一颗火药质量

Ma	Mach 数	v_g	炮口速度
m	弹丸质量	v_j	极限速度
m_a	电枢质量	We	Weber 数
Nu	Nusselt 数	x	空间坐标
n	燃速指数	z	相对燃烧厚度;指前因子
n_i	离子数密度	α	余容;烧蚀系数
n_e	电子数密度	Δ	装填密度
Pr	Prandtl 数	ε	应变
p	压力	ε_y	屈服应变
p_B	点火压力	ε_f	断裂应变
p_m	最大压力	η	阻尼系数;相对流量
p_b	弹底压力	η_b	弹道效率
p_c	燃烧室压力	λ	火药形状特征量;破坏因子
p_L	贮液室压力	μ	粘性系数;化学势;火药形状特征量
Δp_i	初始压差	μ_e	磁导率
Q	单位质量反应热	ρ	密度
q	比热流	ρ_G, ρ_L, ρ_P	分别为气相、液相和固相密度
R	气体常数;颗粒间应力	ρ_G, ρ_L, ρ_P	分别为气相、液相和固相物质密度
Re	Reynolds 数	Σ	两相交界面
R'_r	导轨电阻梯度	σ	表面张力;应力
R_e	等离子电枢的等效电阻	σ_y	屈服应力
\dot{r}	火药燃速	σ_f	断裂应力
S_p	一颗火药表面积	τ	粘性应力
S_m	最大振幅	τ^*	松弛时间
T	气体温度	ϕ	空隙率
t	时间	ϕ_1	稳定空隙率
t_{gr}	点火延迟时间	χ	火药形状特征量
U_b	脉冲功率源端电压	ψ	火药已燃相对体积
u	气流速度	ω	装药质量;相电源角频
u_{max}	逃逸速度	ω_B	点火药质量
u_G, u_L, u_P	分别为气相、液相和固相速度		
V_0	药室容积		
v	弹丸速度		

目 录

主要符号表	I
第一章 枪炮内弹道循环与膛内压力波	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 膛内射击现象与流场特性	2
1.2.1 膛内射击现象	2
1.2.2 膛内流场特性	5
§ 1.3 膛内压力波现象及其产生的机理	6
1.3.1 压力波物理现象	6
1.3.2 膛内压力波的测试方法	10
1.3.3 膛内压力波的特征分析	11
1.3.4 压力波的传播规律	13
1.3.5 压力波形成机理	13
1.3.6 压力波、火焰波和应力波的相互关系	15
§ 1.4 影响压力波的因素分析	17
1.4.1 点火引燃条件	17
1.4.2 初始气体生成速率	20
1.4.3 装填密度	21
1.4.4 火药床的透气性	22
1.4.5 药室自由空间的影响	24
1.4.6 其他因素	25
§ 1.5 压力波的定量描述	27
1.5.1 压差法	27
1.5.2 压力波频谱分析法	29
参考文献	35
第二章 火药颗粒床挤压和破碎的力学现象	37
§ 2.1 引言	37
§ 2.2 火药床压缩特性及颗粒间应力	37
2.2.1 点火传火过程中火药床受力分析	37
2.2.2 探测膛内药粒运动的脉冲 X 光摄影实验	39
2.2.3 火药颗粒的压缩特性	43
2.2.4 火药床的压缩特性与颗粒间应力	49
2.2.5 颗粒床应力波一维模型	58

§ 2.3 火药颗粒破碎特性	60
2.3.1 火药破碎度	60
2.3.2 火药床动态破碎实验	61
2.3.3 单颗粒火药落锤撞击破碎实验	65
§ 2.4 火药颗粒破碎的粘弹性理论	69
2.4.1 火药颗粒非线性粘弹模型	69
2.4.2 破坏函数	74
2.4.3 计算结果与实验结果比较	76
§ 2.5 火药颗粒碰撞破碎数值模拟	78
2.5.1 火药碰撞时机机械载荷的分析	78
2.5.2 计算编码和材料模型	79
2.5.3 数值模拟结果	80
§ 2.6 火药破碎对内弹道性能影响的实验研究	81
2.6.1 密闭爆发器燃烧实验	81
2.6.2 火药破碎对压力波的影响	83
参考文献	84
第三章 反应两相流内弹道理论基础	86
§ 3.1 引言	86
§ 3.2 运动控制体的流体力学平衡方程	87
3.2.1 运动体积和 Reynolds 输运定律	87
3.2.2 物质体积及其平衡方程	88
3.2.3 控制体、运动控制体及其平衡方程	89
§ 3.3 粒状火药床气固两相流内弹道基本方程	90
3.3.1 基本假设	90
3.3.2 分流法双流体模型两相流内弹道平衡方程	91
3.3.3 统计平均法双流体模型两相流内弹道平衡方程	98
3.3.4 颗粒轨道模型两相流内弹道平衡方程	104
§ 3.4 辅助方程	105
3.4.1 相间阻力	106
3.4.2 相间热交换	108
3.4.3 状态方程	109
3.4.4 燃烧速率	110
3.4.5 形状函数	111
3.4.6 点火准则和火药表面温度	111
§ 3.5 管状发射药床两相流内弹道模型	112
3.5.1 开槽管状药	113
3.5.2 未开槽管状药	114

§ 3.6 混合装药多相流内弹道数学模型	117
3.6.1 基本假设	117
3.6.2 基本方程	118
3.6.3 可燃药筒与其他点火元件的方程	120
§ 3.7 多维两相流内弹道数学模型	122
3.7.1 多维两相流内弹道平衡方程	122
3.7.2 柱坐标系下三维两相流内弹道平衡方程	125
3.7.3 轴对称两相流内弹道平衡方程	128
§ 3.8 内弹道两相湍流数学模型	129
3.8.1 基本假设	130
3.8.2 时均方程组	130
3.8.3 $k-\epsilon-k_p$ 模型	131
3.8.4 $k-\epsilon-A_p$ 模型	133
参考文献	134
第四章 高密实火药床燃烧转爆轰	138
§ 4.1 引言	138
§ 4.2 高密实粒状火药床燃烧转爆轰基础实验	139
4.2.1 实验装置	139
4.2.2 实验结果	140
4.2.3 实验现象的分析	143
§ 4.3 燃烧转爆轰的数值模拟	146
4.3.1 基本假设与守恒方程	147
4.3.2 本构方程	149
4.3.3 数值计算方法	153
4.3.4 燃烧转爆轰过程计算结果分析	156
§ 4.4 颗粒床的动态与稳态压缩	158
4.4.1 准静态、动态压缩实验	158
4.4.2 稳态压缩波分析	159
§ 4.5 两相稳态爆轰波分析	167
4.5.1 理论模型	167
4.5.2 平衡终态分析	168
4.5.3 冲击波不连续条件	171
4.5.4 两相爆轰结构	172
§ 4.6 粒状火药床燃烧转爆轰的机理	174
参考文献	177
第五章 反应两相流内弹道模型的数值模拟	180

§ 5.1	引言	180
§ 5.2	一维两相流内弹道模型的数值求解	181
5.2.1	向量形式两相流内弹道控制方程组	181
5.2.2	方程组类型	182
5.2.3	差分格式及稳定性条件	186
5.2.4	边界条件与初始条件	188
5.2.5	网格自动生成技术	191
5.2.6	间断处理及人工粘性	191
5.2.7	滤波和守恒性检查	192
§ 5.3	轴对称两相流内弹道模型数值求解方法	193
5.3.1	向量形式的两相流基本方程	193
5.3.2	坐标变换及方程变换	194
5.3.3	计算方法	195
5.3.4	初始条件与边界条件	196
5.3.5	人工粘性	197
§ 5.4	三维两相流内弹道模型数值求解方法	199
5.4.1	柱坐标系下主装药床控制方程	199
5.4.2	坐标变换形式	200
5.4.3	分裂差分格式设计	202
5.4.4	壁面边界单侧差分格式	202
5.4.5	数值振荡抑制方法	203
§ 5.5	单一粒状药床内弹道数值模拟结果及分析	204
5.5.1	常规金属点火管点火结构	204
5.5.2	烟火双层点火管点火结构	205
5.5.3	喷管点火管点火结构	207
5.5.4	不同点火结构的理论与试验压力波的比较分析	207
§ 5.6	单一管状药床内弹道模拟结果及其分析	208
5.6.1	开槽管状药床	208
5.6.2	未开槽管状药床	209
§ 5.7	混合装药床内弹道模拟结果分析	212
5.7.1	两种粒状药组成的混合装药床	212
5.7.2	76 mm 火炮	214
5.7.3	105 mm 火炮	215
5.7.4	130 mm 加农炮	216
5.7.5	152 mm 榴弹炮	220
§ 5.8	装药间隙对压力波影响的数值模拟	221
§ 5.9	火药破碎对压力异常影响的数值模拟	224
5.9.1	火药破碎与颗粒间应力	225

5.9.2 模拟结果及其分析	225
§ 5.10 轴对称两相流内弹道数值模拟	227
§ 5.11 三维两相流内弹道数值模拟	229
§ 5.12 内弹道数值模拟小结	231
参考文献	233
第六章 火药床点火与传火	236
§ 6.1 引言	236
§ 6.2 点火基本概念与点火准则	237
6.2.1 点火基本概念	237
6.2.2 点火准则	238
§ 6.3 火药热分解实验	239
6.3.1 热分解基本特性	240
6.3.2 热分解动力学参数	243
§ 6.4 火炮的点火系统	244
6.4.1 炮膛中的点火和传火	244
6.4.2 点火系统的基本性能	247
6.4.3 影响点火过程的因素	248
§ 6.5 点火理论模型	250
6.5.1 固相点火理论	250
6.5.2 气相点火理论	252
6.5.3 异相点火理论	252
6.5.4 统一的点火理论	253
6.5.5 点火理论及模型比较	254
§ 6.6 综合点火模型数值分析	255
6.6.1 物理模型	255
6.6.2 数学模型	256
6.6.3 计算方法及结果讨论	259
§ 6.7 中心点火管数学物理模型及计算	262
6.7.1 点火管的物理模型	262
6.7.2 点火管的数学模型	263
6.7.3 数值计算结果及分析	267
§ 6.8 新概念点火结构	268
6.8.1 双管点火和快速点火传播(RIP)点火管	269
6.8.2 低速爆轰点火装置(LVD)	270
6.8.3 激光点火	271
6.8.4 爆炸网络点火	278
参考文献	278

第七章 轻气炮内弹道理论	280
§ 7.1 影响弹丸初速的基本因素	280
§ 7.2 弹丸最大可能速度	281
7.2.1 定常假设下的极限速度	281
7.2.2 经典内弹道理论的弹丸极限速度	282
7.2.3 非定常等熵假设下的逃逸速度	283
7.2.4 三种极限速度的讨论	284
§ 7.3 膛内气体压力扰动的传播	285
7.3.1 膛内气体压力扰动传播的定性分析	285
7.3.2 声惯性	286
§ 7.4 超高速火炮的理想工质	289
7.4.1 增大逃逸速度	289
7.4.2 减小声惯性	290
§ 7.5 一级轻气炮——预燃火炮	291
7.5.1 预燃火炮发射原理	291
7.5.2 基本假设和方程组	292
7.5.3 膛内气体介质中的扰动传播	293
7.5.4 等截面简波条件预燃炮特征方程	294
7.5.5 等截面简波条件预燃炮中理想发射药气体方程系	295
7.5.6 等截面非简波条件下的预燃火炮	297
7.5.7 有坡膛情况下的预燃火炮	299
7.5.8 一级轻气炮内弹道数值模拟	301
§ 7.6 二级轻气炮工作原理及数学模型	304
7.6.1 二级轻气炮的工作原理	304
7.6.2 二级轻气炮数学模型	305
7.6.3 化学反应加热	310
参考文献	311
第八章 液体发射药火炮推进原理及其内弹道数学模型	312
§ 8.1 引言	312
§ 8.2 液体发射药火炮的内弹道循环	314
8.2.1 整装式液体发射药火炮的内弹道循环	314
8.2.2 再生式液体发射药火炮的内弹道循环	317
§ 8.3 高压喷射雾化的实验研究	320
8.3.1 实验装置	321
8.3.2 圆柱形喷嘴瞬时射流形态	321
8.3.3 环形间隙喷嘴瞬时射流形态	322
8.3.4 射流核	323

§ 8.4 液体射流破碎和雾化机理	324
8.4.1 液体射流破碎成液滴的机理	324
8.4.2 未破碎射流长度的数学描述	325
8.4.3 射流破碎形成液滴尺寸的数学描述	326
8.4.4 射流雾化模型	327
§ 8.5 再生式喷射模型	329
8.5.1 以往喷射模型的回顾	329
8.5.2 喷射模型的建立	330
§ 8.6 液体燃料的物理化学性能	332
8.6.1 液体燃料的分类及其理化性能	332
8.6.2 液体燃料性能的基本要求	335
§ 8.7 HAN 基发射药液滴燃烧	337
8.7.1 液滴燃烧实验方法	338
8.7.2 HAN 基发射药液滴燃烧特性	339
8.7.3 HAN 基发射药液滴燃烧简化模型	342
§ 8.8 再生式液体发射药火炮内弹道零维模型	346
8.8.1 内弹道模型应考虑的因素	347
8.8.2 物理模型及基本假设	348
8.8.3 基本方程	349
8.8.4 再生式液体发射药火炮内弹道封闭方程组	352
8.8.5 初始条件	353
§ 8.9 再生式液体发射药火炮内弹道 Lagrange 问题	355
8.9.1 气动力数学模型和速度分布	355
8.9.2 弹后空间压力分布	357
8.9.3 弹后空间的平均压力	358
§ 8.10 计算例题	359
§ 8.11 再生式液体发射药火炮内弹道气液两相双连续数学模型	362
8.11.1 物理现象和基本假设	362
8.11.2 数学模型	364
8.11.3 定解条件	367
8.11.4 数值解的坐标变换	367
§ 8.12 再生式液体发射药火炮内弹道气液两相轨道模型	368
8.12.1 物理模型	368
8.12.2 数学模型	369
§ 8.13 整装式液体发射药火炮气液两相流内弹道数学模型	373
8.13.1 整装式液体发射药火炮的内弹道特点	373
8.13.2 数学模型	374
8.13.3 液体卷吸	378

8.13.4 边界条件	379
§ 8.14 液体发射药火炮的点火	380
8.14.1 点火器的基本要求	380
8.14.2 电点火	381
8.14.3 其他点火方式	384
参考文献	385
第九章 电磁推进原理及其内弹道数学模型	387
§ 9.1 电磁推进概念、意义及应用前景	387
9.1.1 电磁炮的发展概况	387
9.1.2 电磁炮的优点及应用前景	389
9.1.3 电磁炮的关键技术	391
§ 9.2 电磁炮的分类	392
9.2.1 导轨炮	392
9.2.2 线圈炮	393
9.2.3 重接炮	393
§ 9.3 电磁导轨炮的内弹道模型	395
9.3.1 固体电枢内弹道方程组	395
9.3.2 等离子体电枢内弹道方程组	397
9.3.3 转换效率	400
§ 9.4 分散馈电导轨炮	401
9.4.1 分散馈电的作用及方式	401
9.4.2 分散馈电导轨炮内弹道方程组	403
§ 9.5 箍缩电磁炮	404
9.5.1 箍缩电磁炮的概念	404
9.5.2 箍缩电磁炮的理论模型	405
§ 9.6 电磁火箭炮	408
9.6.1 基本概念及分类	409
9.6.2 理论模型	410
§ 9.7 电磁线圈炮的空间应用	411
9.7.1 小卫星发射	412
9.7.2 月球氧的运送	412
参考文献	413
第十章 电热化学炮内弹道理论	415
§ 10.1 电热化学炮的发射原理	415
§ 10.2 受约束高压放电等离子体的基本性质	416
10.2.1 等离子体存在的基本条件	416

10.2.2 等离子体的鞘层	417
10.2.3 等离子体状态方程	418
10.2.4 等离子体的宏观方程	419
§ 10.3 化学工质的选择及其热化学性能	421
10.3.1 化学工质的分类	421
10.3.2 工质的热化学性质	422
§ 10.4 等离子体与化学工质的相互作用	426
10.4.1 化学工质的反应速率	426
10.4.2 影响化学工质反应速率的因素	428
10.4.3 化学工质反应速率对内弹道性能的影响	429
§ 10.5 电热化学炮内弹道经典模型	432
10.5.1 放电管等离子体数学模型	433
10.5.2 燃烧室内弹道数学模型	435
10.5.3 计算举例	438
§ 10.6 液体发射药电热化学炮内弹道一维两相流模型	439
10.6.1 物理模型	439
10.6.2 放电管内等离子体一维流动数学模型	440
10.6.3 燃烧室一维两相流数学模型	440
10.6.4 算例	443
§ 10.7 电热炮脉冲功率源	444
10.7.1 电容器组储能技术	445
10.7.2 电容器组放电技术	447
10.7.3 脉冲形成网络及数学模型	449
参考文献	450
第十一章 冲压加速发射原理	452
§ 11.1 引言	452
§ 11.2 冲压加速原理及工作模式	454
11.2.1 冲压加速原理概述	454
11.2.2 冲压加速工作模式	456
§ 11.3 混合气体工质	457
11.3.1 混合气体种类及热力学性质	458
11.3.2 混合气体的燃烧实验	458
11.3.3 混合气体的高压不稳定燃烧分析	459
11.3.4 频谱分析	460
11.3.5 混合气体工质的 C-J 爆轰速度	461
§ 11.4 亚音速燃烧热节制推进一维内流场数值模拟	464
11.4.1 基本假设	464