

火炮装药设计安全学

Charge Design Safety of Guns

金志明 翁春生 著



國防工業出版社

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫悟生	崔尔杰	

前 言

随着军事科学技术的发展,特别是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。无论是提高防空兵器的作战效能,研制对付未来新型装甲目标的反坦克兵器,还是在纵深宽正面上对步兵提供火力支援的压制兵器,对火炮的内弹道性能都提出了更高的要求。在这种防空、反导,特别是坦克和反坦克兵器发展需要的推动下,世界各国都相继发展高膛压火炮推进技术。它主要是通过增加装填密度,将膛压由原来的 $200 \sim 300\text{MPa}$ 提高到 $400 \sim 700\text{MPa}$,以达到增加弹丸初速的目的。这种高膛压、高初速、高装填密度的火炮发射系统,使弹丸的初速有明显的提高。然而,新的严重问题也随之而来,极危险的膛炸现象时有发生,对兵器和炮手的安全带来很大的威胁,发射安全性成为高膛压火炮发展的一种障碍。因此,研究火炮装药射击安全性的理论及其防止技术已成为当前火炮武器发展中的一项重要任务。

《火炮装药设计安全学》就是在上述的背景下产生的,它是现代内弹道学、装药设计和安全学相交叉的学科,是有关压力波理论与装药射击安全评估的学术专著。全书共分八章,第一章是膛内射击现象与压力波,用现代内弹道学理论阐述膛内压力波形成机理、影响因素及其压力波的定量描述。第二章是火炮膛内火药颗粒破碎的力学现象,讨论火药颗粒破碎的力学响应、实验方法及对压力波的影响。第三章是压力波的理论基础,在反应多相流体力学的基础上建立起描述内弹道循环及压力波的物理和数学模型。第四章是压力波数值模拟,用近代的数值分析方法讨论压力波的计算方法以及不同装药结构条件下的初始条件和边界条件,对一些典型火炮的装药结构进行压力波数值模拟。第五章是高密实火

药床燃烧转爆轰,阐述火药床燃烧转爆轰的机理、实验方法及其数学模型的建立、数值计算及影响燃烧转爆轰的因素分析。第六章是装药安全性评估,讨论膛炸模式及机理。在压力波安全性评估的基础上,讨论装药安全性评估的方法及其实施规程。第七章讨论提高装药安全性的技术途径,着重研究一些新型点火系统对提高装药安全性的作用。第八章为检测装药安全性实验技术。本书重点讨论了膛内压力波产生的机理及影响因素,为装药安全性评估奠定物理基础,在此基础上建立压力波的数学模型和数值方法,提出装药安全性的评估准则和评估操作规程。由于火药破碎是诱发膛炸的一个重要因素,因此也用了较大的篇幅着重讨论火药的破碎规律,为膛炸机理分析提供实验和理论基础。

装药射击安全性已成为大口径、高膛压火炮装药设计中一个极其重要的问题。美国在 20 世纪 60 年代就开始研究压力波和膛炸现象,并且制订了装药安全性检验规程(ITOP),建立起以多相流体力学为基础的现代内弹道学理论。我国在 20 世纪 70 年代后期开展了这项研究工作,经过十多年的研究,在理论和实验方法上都取得了很多成果,建立起了有自己特色的研究方法。我国目前尚未制订装药安全性检验规程,有关理论在兵器行业中的推广应用仍然不够普及和深入。因此,本书的出版为促进该领域研究工作的进一步发展,制订我国的装药安全性检验规程,提高装药设计理论水平乃至内弹道学理论的更新均能发挥积极作用。

火炮装药设计安全学涉及到武器系统中火炮、弹丸、引信和火药各领域中的设计、试验和生产等方面的问题,应用相当广泛。读者对象为科研院(所)、高等院校、工厂、靶场、部队从事科学研究、设计、教学与试验的工程技术人员、高校教师和研究生。

本书第一、二、六、七、八章由金志明撰写,第三、四、五章由翁春生撰写。由于作者水平有限,书中缺点甚至错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

金志明

1999 年于南京理工大学

主 要 符 号 表

A	炮膛截面积	$g(\lambda)$	破坏函数
A_g, A_p	分别为气相、固相所占据的控制体外边界面积	h	比焓, 放热系数
$\bar{A}_p$	火药床单位体积表面积	I_k	压力全冲量
a_1	导温系数	K	应力衰减因子
a	固相声速	k	比热比, 等熵指数
Br	火药破碎度	k_f, k_p	分别为气相、固相导热系数
c	气相声速	l	诱导爆轰长度
c_v	定容比热容	M_p	一颗火药质量
c_p	定压比热容	m	弹丸质量
D	爆轰速度	Nu	努塞尔数
d	火炮口径	n	燃速指数
d_p	球形药粒直径	Pr	普朗特数
E, E_f	弹性模量, 断裂模量	p	压力
$E(t)$	松弛模量	p_B	点火压力
E_p	火药潜能, 压缩模量	p_m	最大压力
e_g, e_p	分别为气相、固相比内能	p_b	弹底压力
f	火药力	Δp_i	初始压差
f_0	主频率	Q	单位质量反应热
f_p	单位体积相间阻力	q	热流密度, 对流换热量
f_s	稳态条件下单位体积相间阻力	R	气体常数, 颗粒间应力
		Re	雷诺数
		$\dot{r}$	燃烧线速度

S_p	一颗火药表面积	η	阻尼系数
S_m	最大振幅	λ	破坏因子,火药形状特征量
T	气体温度	μ	粘性系数,火药形状特征量
T_1	定容燃烧温度	ρ_g, ρ_p	分别为气相、固相分密度
t	时间	$\hat{\rho}_g, \hat{\rho}_p$	分别为气相、固相物质密度
t_{gr}	点火延迟时间	Σ	两相交界面面积
u	气流速度	σ	应力,火药相对燃烧面积
u_g, u_p	分别为气相、固相速度	σ_y	屈服应力
V_0	药室容积	σ_f	断裂应力
x	空间坐标	τ^*	松弛时间
Z	指前因子,相对已燃厚度	ϕ	空隙率
α	余容	ϕ_1	稳定空隙率
Γ	气体生成猛度	χ	火药形状特征量
Δ	装填密度	ψ	火药已燃相对体积
δ	火药已燃厚度	ω	装药质量
δ_1	火药厚度的一半	ω_B	点火药质量
ϵ	应变		
ϵ_y	屈服应变		
ϵ_f	断裂应变		

目 录

绪论	1
1. 压力波与装药射击安全性的关系	1
2. 火炮装药设计安全学在装药设计中的地位	2
3. 火炮装药设计安全学的研究内容及方法	3
4. 国内外有关该领域的研究状况	5
第一章 膛内射击现象与压力波	8
§ 1.1 引言	8
§ 1.2 膛内射击过程	10
1.2.1 点火传火过程	10
1.2.2 挤进过程	11
1.2.3 弹丸在膛内运动过程	11
1.2.4 后效作用时期	13
§ 1.3 膛内压力波的基本概念	13
1.3.1 膛内压力波的测试方法	13
1.3.2 膛内压力波的特征分析	15
1.3.3 压力波的传播规律	17
1.3.4 压力波形成机理	18
1.3.5 压力波、火焰波和应力波的相互关系	20
§ 1.4 影响压力波的因素分析	23
1.4.1 点火引燃条件	23
1.4.2 初始气体生成速率	27
1.4.3 装填密度	28
1.4.4 火药床的透气性	29
1.4.5 药室自由空间的影响	32

1.4.6 其它因素	33
§ 1.5 压力波的定量描述	35
1.5.1 压差法	35
1.5.2 压力波频谱分析法	38
第二章 火炮膛内火药颗粒破碎的力学现象	46
§ 2.1 点火传火过程中火药床的力学现象	46
2.1.1 点火传火过程中火药床受力分析	46
2.1.2 探测膛内药粒运动的脉冲 X 光摄影实验	48
2.1.3 火药颗粒的压缩特性	53
2.1.4 颗粒间应力与火药床的压缩特性	60
2.1.5 颗粒床应力波一维模型	72
§ 2.2 火药颗粒破碎特性	75
2.2.1 火药破碎度	75
2.2.2 火药床动态破碎实验	76
2.2.3 单颗粒火药落锤撞击破碎实验	81
§ 2.3 火药颗粒破碎的粘弹性理论	86
2.3.1 火药颗粒非线性粘弹模型	86
2.3.2 破坏函数	91
2.3.3 计算结果与实验结果的比较	95
§ 2.4 火药颗粒碰撞破碎数值模拟	96
2.4.1 火药碰撞时机机械载荷的分析	96
2.4.2 计算编码和材料模型	98
2.4.3 数值模拟结果	99
§ 2.5 火药破碎对内弹道性能影响的实验研究	102
2.5.1 密闭爆发器燃烧实验	102
2.5.2 火药破碎对压力波的影响	104
第三章 压力波的理论基础	106
§ 3.1 引言	106
§ 3.2 气固两相流内弹道方程	107
3.2.1 运动控制体的流体力学平衡方程	108

3.2.2	基本假设	111
3.2.3	分流法双流体模型两相流内弹道平衡方程	111
3.2.4	统计平均法双流体模型两相流内弹道平衡 方程	121
3.2.5	颗粒轨道模型两相流内弹道平衡方程	129
3.2.6	辅助方程	130
3.2.7	点火准则和火药表面温度	137
§ 3.3	管状发射药床多相流内弹道模型	138
3.3.1	开槽管状药	139
3.3.2	未开槽管状药	140
§ 3.4	混合装药多相流内弹道数学模型	143
3.4.1	基本假设	144
3.4.2	基本方程	144
3.4.3	可燃药筒与其它点火元件的方程	147
§ 3.5	多维两相流内弹道数学模型	150
3.5.1	多维两相流内弹道平衡方程	150
3.5.2	柱坐标系下三维两相流内弹道平衡方程	154
3.5.3	轴对称两相流内弹道平衡方程	157
§ 3.6	内弹道两相湍流数学模型	159
3.6.1	基本假设	159
3.6.2	时均方程组	160
3.6.3	$k-\epsilon-k_p$ 模型	161
3.6.4	$k-\epsilon-A_p$ 模型	163
第四章	压力波数值模拟	165
§ 4.1	引言	165
§ 4.2	一维两相流内弹道模型的数值求解	167
4.2.1	向量形式两相流内弹道控制方程组	167
4.2.2	方程组类型	168
4.2.3	差分格式及稳定性条件	172
4.2.4	边界条件与初始条件	175

4.2.5	网格自动生成技术	179
4.2.6	间断处理及人工粘性	179
4.2.7	滤波和守恒性检查	180
§ 4.3	轴对称两维两相流内弹道模型数值求解方法	181
4.3.1	向量形式的两相流基本方程	181
4.3.2	坐标变换及方程变换	183
4.3.3	计算方法	184
4.3.4	初始条件与边界条件	185
4.3.5	人工粘性	186
§ 4.4	柱坐标系下三维两相流内弹道模型数值求解 方法	188
4.4.1	主装药床守恒形式控制方程	188
4.4.2	坐标变换形式	190
4.4.3	分裂差分格式设计	191
4.4.4	壁面边界单侧差分格式	192
4.4.5	数值振荡抑制方法	193
§ 4.5	粒状药床压力波数值模拟结果及分析	194
§ 4.6	管状发射药床压力波模拟结果及其分析	198
4.6.1	数值计算方法	198
4.6.2	计算结果分析	199
§ 4.7	混合装药床压力波模拟结果分析	201
4.7.1	两种粒状药组成的混合装药床	201
4.7.2	130mm 加农炮	202
4.7.3	152mm 榴弹炮	206
§ 4.8	装药间隙对压力波影响的数值模拟	207
§ 4.9	火药破碎对压力波影响的数值模拟	210
4.9.1	火药破碎与颗粒间应力	211
4.9.2	模拟结果及分析	211
§ 4.10	二维效应对压力波动影响的数值模拟	214
§ 4.11	三维效应对压力波动影响的数值模拟	216

§ 4.12 压力波数值模拟小结	218
第五章 高密实火药床燃烧转爆轰	221
§ 5.1 引言	221
§ 5.2 高密实粒状火药床燃烧转爆轰基础实验	223
5.2.1 实验装置	223
5.2.2 实验结果	224
5.2.3 实验现象的分析	227
§ 5.3 燃烧转爆轰的数值模拟	232
5.3.1 基本假设与守恒方程	232
5.3.2 本构方程	235
5.3.3 数值计算方法	240
5.3.4 燃烧转爆轰过程计算结果分析	243
§ 5.4 粒状火药燃烧转爆轰的机理	245
第六章 装药安全性评估	247
§ 6.1 引言	247
§ 6.2 膛炸模式及其机理	249
6.2.1 膛炸模式	249
6.2.2 膛炸机理分析	251
§ 6.3 压力波安全性评估与压力波敏感度	254
6.3.1 压力波安全性评估	254
6.3.2 某些火炮装药的的压力波敏感度曲线分析	256
§ 6.4 装药安全性的评估方法	265
6.4.1 基于 $-\Delta p_i$ 的评估方法	265
6.4.2 基于频谱分析的评估方法	269
第七章 提高装药安全性的技术途径	271
§ 7.1 引言	271
§ 7.2 点火与点火理论	272
7.2.1 点火现象与点火准则	272
7.2.2 炮膛中的点火和传火	275
7.2.3 点火系统的基本性能	278

7.2.4 影响点火过程的因素	279
7.2.5 点火理论模型	282
7.2.6 点火理论及模型的比较	287
§ 7.3 综合点火模型数值分析	288
7.3.1 物理模型	288
7.3.2 数学模型	290
§ 7.4 中心点火管数学物理模型及计算	297
7.4.1 点火管的物理模型	297
7.4.2 点火管的数学模型	299
7.4.3 数值计算结果及分析	303
§ 7.5 新概念点火结构	305
7.5.1 双管点火和快速点火传播(RIP)点火管	305
7.5.2 低速爆轰点火装置(LVD)	306
7.5.3 激光点火	309
7.5.4 爆炸网络点火	316
§ 7.6 控制火药初始气体生成速率	317
7.6.1 阻燃技术	318
7.6.2 多孔和切口多孔火药	320
7.6.3 有序分裂杆状药	321
§ 7.7 改善火药床透气性和合理配置自由空间	322
7.7.1 改善火药床透气性	322
7.7.2 合理配置装药的自由空间	323
§ 7.8 提高火药动力学性能	325
第八章 检测装药安全性的实验技术	327
§ 8.1 膛内燃气压力的测量	328
8.1.1 应变电阻测压法	329
8.1.2 压电测压法	330
8.1.3 传感器选择的一般原则	332
8.1.4 电荷放大器	334
8.1.5 瞬态记录仪	337

§ 8.2 火药定容燃烧实验	339
8.2.1 实验系统	339
8.2.2 密闭爆发器定容状态方程	342
8.2.3 压力损失的修正	343
8.2.4 密闭爆发器的应用	346
参考文献	349

Contents

Generalization	1
1. The Relation Between Pressure Wave and Propellant Charge Safety	1
2. The Action of Charge Design Safety on the Field of Charge Design	2
3. The Contents and Research Method of Charge Design Safety of Guns	3
4. The Study State of this Field in Nation and Foreign Countries	5
Chapter 1 Fire Phenomena and Pressure Wave in Guns	8
§ 1.1 Introduction	8
§ 1.2 Fire Process in Guns	10
1.2.1 The Process of Ignition and Flamespreading	10
1.2.2 Engraving Process	11
1.2.3 The Process of Projectile Movement in Bore	11
1.2.4 Ulterior Period	13
§ 1.3 Basic Conception of Pressure Wave in Guns	13
1.3.1 The Measured Method of Pressure Wave	13
1.3.2 The Characteristic Analysis of Pressure Wave	15
1.3.3 The Law of Pressure Wave Spreading	17
1.3.4 Forming Mechanism of Pressure Wave	18
1.3.5 The Interrelations of Pressure Wave, Flame Wave and Stress Wave	20
§ 1.4 The Analysis of the factors to Affect Pressure	

Wave	23
1.4.1 Ignition Condition	23
1.4.2 Initial Gas Generation Rate	27
1.4.3 Loading Density	28
1.4.4 Permeability of Propellant Bed	29
1.4.5 Free Space of Chamber	32
1.4.6 Other Factors	33
§ 1.5 Quantitative Analysis of Pressure Wave	35
1.5.1 Pressure Difference Method	35
1.5.2 Frequency-spectrum Analysis	38
Chapter 2 Mechanical Phenomena of Grain Fracture	
in Guns	46
§ 2.1 Mechanical Phenomena of Propellant Bed in the Process of Ignition and Flamespreading	46
2.1.1 The Analysis of the Force on Propellant Bed in the Process of Ignition and Flamespreading	46
2.1.2 Pulse X Ray Photographic Technology to Probe Motion of Propellant Grain	48
2.1.3 The Compressibility of Propellant Grain	53
2.1.4 Intergranular Stress and Compressibility of Propellant Bed	60
2.1.5 One-dimensional Model of Stress Wave in Propellant Particle Bed	72
§ 2.2 The Characteristics of Propellant Grain Fracture	75
2.2.1 The Degree of Grain Fracture	75
2.2.2 Dynamic Fracture Experiment of Propellant Bed	76
2.2.3 Single Grain Fracture Experiment by Fall-hammer	81
§ 2.3 Viscous-elastic Theory for Grain Fracture	86
2.3.1 Non-Linear Viscous-elastic Model for Grain Fracture	86
2.3.2 Damage Function	91
2.3.3 Comparison Between Computational and Experimental Results	95
§ 2.4 Numerical Simulation of Grain Fracture by	