



国防科技图书出版基金

再生式液体发射药火炮 发射过程仿真



Launching Process Simulation
of Regenerative Liquid Propellant Gun

张相炎 刘宁 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

再生式液体发射药 火炮发射过程仿真

Launching Process Simulation of
Regenerative Liquid Propellant Gun

张相炎 刘宁 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

再生式液体发射药火炮发射过程仿真/张相炎,刘宁著.
—北京:国防工业出版社,2014.2
ISBN 978-7-118-09275-2

I. ①再... II. ①张... ②刘... III. ①液体发射药—
火炮—发射模拟—仿真 IV. ①TJ306-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 015430 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
国防工业出版社印刷厂印刷
新华书店经售



*

开本 880×1230 1/32 印张 6 $\frac{1}{8}$ 字数 165 千字
2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 33.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

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

IV

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

火炮的发展源于军事需求的牵引和科学技术的推动。随着世界范围内新军事变革的不断深入,对火炮技术的主要需求也发生了明显的变化,基础研究及装备研制都取得了长足的进展,为火炮的发展注入了新的活力。然而,由于常规火炮发射过程中自身的固有局限性,使得常规火炮在进一步提高射程、射速、机动性、生存能力和后勤支援能力等综合性能方面,遇到很大困难,已难以取得突破性的进展,促使人们另辟蹊径,从根本上变革常规火炮在发射原理上的发展思维和模式,以期解脱常规火炮发展所面临的困境。火炮行业面临着严峻形势,火炮技术持续发展,只有积极开拓创新,才能不断提高火炮行业的自主创新能力。武器发展的历史,在一定意义上是概念创新及其实践应用的历史。概念创新是带有根本方向性的创新。为了提高火炮的性能,积极寻求新的发射原理是火炮的主要研究方向,液体发射药火炮就是其中之一。

再生式液体发射药火炮,利用液体发射药作为发射能源,利用再生喷射原理进行工作,利用膛压的平台效应提高初速,利用无药筒和发射药自动加注提高射速,利用液体发射药可变性减小弹药储存体积和提高携弹量,利用液体发射药低易损性提高安全性,利用液体发射药加注可控性实现发射无人控制。再生式液体发射药火炮,具有高初速、高射速、整体性能好,以及与传统火炮有较大继承性等优点,是传统火炮无法比拟的。液体发射药火炮的优越性能已在美国的样炮中得到了证明和实现。液体发射药火炮技术给火炮系统带来的深刻变革为火炮发展

展现了美好的前景。但是,再生式液体发射药火炮结构复杂,其工程应用中还存在一些技术难题。计算机技术的迅猛发展为再生式液体发射药火炮研究提供了强有力工具,仿真研究已经成为复杂现象和机理研究的重要手段。

本书作者从事液体发射药火炮技术研究 20 余年,取得一系列研究成果。本书结合作者研究经验和成果,从系统角度论述再生式液体发射药火炮发射过程及其仿真技术,填补液体发射药火炮技术空白,具有时代特色和先进性。本书系统论述液体发射药火炮发射过程仿真实论和方法,具有较强的针对性和实用性。

本书共分为八章。第一章绪论,在分析常规火炮发射过程及其局限性的基础上,介绍液体发射药及其特性,以及液体发射药火炮基本原理;第二章再生式液体发射药火炮发射过程,系统介绍再生式液体发射药火炮的发射原理、特点和发展;第三章再生式液体发射药火炮发射过程零维仿真模型,在分析再生式液体发射药火炮发射过程的基础上,构建再生式液体发射药火炮发射过程物理模型、点火过程模型、液体发射药喷射和雾化及燃烧模型,以及发射过程零维仿真模型;第四章再生式液体发射药火炮发射过程零维仿真,在设计和编制发射过程零维仿真程序及其验证的基础上,仿真研究了点火参数对发射过程的影响规律及其控制、结构参数对发射过程的影响规律及其优化等;第五章再生式液体发射药火炮发射过程一维模型,构建再生式液体发射药火炮发射过程物理模型、气相控制模型、液滴控制模型等一维仿真模型;第六章再生式液体发射药火炮发射过程一维仿真,在分析和选择数值计算方法的基础上,构建再生式液体发射药火炮发射过程一维仿真初始条件和边界条件,设计编制了再生式液体发射药火炮燃烧室一维颗粒轨道模型数值仿真程序,进行数值仿真,对仿真结果进行分析;第七章再生式液体发射药火炮发射过程二维两相流动模型,构建再生式液体发射药火炮发射过程物理模型、雾化模型、液滴控制模型、气相控制模型等

二维两相流动仿真模型;第八章再生式液体发射药火炮发射过程二维仿真,在分析和选择数值计算方法的基础上,设计编制了再生式液体发射药火炮喷雾燃烧过程数值仿真程序,仿真研究了高速环形射流破碎雾化特性以及发射过程。

基础研究水平制约着新原理火炮技术的进一步发展。本书系统介绍了再生式液体发射药火炮基础性研究理论和方法,希望本书的出版能够为提高我国新原理火炮技术研究水平、提高高等学校相关学科的教学水平贡献一份绵薄之力。

感谢国防科技图书出版基金评审委员会对本书初稿提出的宝贵意见。本书的出版得到国防科技图书出版基金的资助,以及国防工业出版社给予的支持,谨致谢意。在编写中参考了一些著作和论文,谨在此一并表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中一定会有遗误和不妥之处,诚恳欢迎读者批评指正。

张相炎

2013年10月 于南京

目 录

第一章 绪论	1
1.1 常规火炮发射过程及其局限性	1
1.1.1 未来战争对火炮提出了新要求	1
1.1.2 常规火炮的发射过程	4
1.1.3 常规火炮的固有局限性	6
1.2 液体发射药及其特性	8
1.2.1 固体发射药的不足	8
1.2.2 液体发射药的优势	9
1.2.3 炮用液体发射药的要求	11
1.2.4 炮用液体发射药及其性能	12
1.3 液体发射药火炮	15
第二章 再生式液体发射药火炮发射过程	19
2.1 再生式液体发射药火炮发射原理	19
2.2 再生式液体发射药火炮特点	21
2.2.1 再生式液体发射药火炮的结构特点	21
2.2.2 再生式液体发射药火炮的优势	22
2.2.3 再生式液体发射药火炮关键技术与难点	24
2.3 液体发射药火炮发展简介	27
2.3.1 液体发射药火炮技术发展	27
2.3.2 再生式液体发射药火炮技术应用	35
第三章 再生式液体发射药火炮发射过程零维仿真模型	46
3.1 物理模型及基本假设	46

3.1.1	再生式液体发射药火炮物理模型	46
3.1.2	基本假设	49
3.2	点火过程模型	50
3.2.1	点火过程物理模型	50
3.2.2	点火过程瞬时模型	51
3.2.3	点火过程燃烧模型	52
3.3	液体发射药喷射、雾化和燃烧模型	54
3.3.1	液体发射药喷射模型	54
3.3.2	液体发射药雾化模型	56
3.3.3	液体发射药燃烧模型	58
3.4	发射过程模型	58
3.4.1	贮液室模型	58
3.4.2	燃烧室模型	59
3.4.3	活塞运动	61
3.4.4	弹丸运动	61
3.5	再生喷射结构优化模型	61
3.5.1	再生喷射结构参数优化设计模型	62
3.5.2	再生喷射过程的最优控制模型	64
第四章	再生式液体发射药火炮发射过程零维仿真	69
4.1	发射过程零维仿真及其验证	69
4.1.1	仿真程序设计	69
4.1.2	发射过程仿真及其验证	71
4.2	点火参数对发射过程影响规律及其控制	73
4.2.1	点火器参数对点火性能的影响	73
4.2.2	点火器参数对发射过程的影响	77
4.2.3	点火控制技术	80
4.3	结构参数对发射过程影响规律及其优化	82
4.3.1	再生喷射结构参数优化设计	82
4.3.2	压力平台及其控制	88
4.3.3	再生喷射过程的最优控制	92

第五章	再生式液体发射药火炮发射过程一维模型	97
5.1	物理模型及基本假设	98
5.2	气相控制模型	99
5.2.1	输运方程	99
5.2.2	连续方程	100
5.2.3	动量守恒方程	101
5.2.4	能量方程	101
5.3	液滴控制模型	102
5.3.1	液滴在流场中的受力	102
5.3.2	液滴运动方程	104
5.3.3	液滴燃烧方程	106
5.3.4	液滴传热方程	106
5.4	辅助模型	107
5.4.1	贮液室质量守恒方程	107
5.4.2	液体药喷注控制方程	108
5.4.3	状态方程	108
5.4.4	活塞和弹丸运动方程	108
第六章	再生式液体发射药火炮发射过程一维仿真	110
6.1	数值计算方法	110
6.1.1	差分格式	111
6.1.2	人工黏性	112
6.1.3	滤波技术及守恒性检验	112
6.2	初始条件和边界条件	113
6.2.1	气相初始条件	113
6.2.2	气相边界条件	114
6.2.3	液滴初始条件	116
6.2.4	计算流程	118
6.3	数值模拟结果与分析	119
6.3.1	再生喷射燃烧试验	119

6.3.2	数值计算结果	121
6.3.3	压力振荡影响因素分析	125
第七章	再生式液体发射药火炮发射过程二维两相流动模型	128
7.1	物理模型及基本假设	130
7.2	气相控制模型	130
7.2.1	圆柱坐标系下控制方程	130
7.2.2	任意曲线坐标系下气相控制方程	131
7.3	雾化模型	134
7.3.1	环形射流破碎模型	136
7.3.2	液滴初始条件	139
7.3.3	液滴与壁面的碰撞	139
7.3.4	喷雾特性参数计算	140
7.4	液滴控制模型	140
7.4.1	液滴运动方程	141
7.4.2	任意曲线坐标系下液滴运动方程	142
第八章	再生式液体发射药火炮发射过程二维仿真	144
8.1	数值计算方法	144
8.1.1	网格生成方法	144
8.1.2	气相控制方程求解方法	145
8.1.3	气相初边界条件	148
8.1.4	液滴控制方程求解方法	151
8.1.5	气液两相耦合源项计算	152
8.2	高速环形射流破碎雾化特性仿真	154
8.2.1	动态喷雾模拟	154
8.2.2	影响因素分析	157
8.3	发射过程仿真	158
8.3.1	程序设计与实现	158
8.3.2	各物理量时空分布规律	163
8.3.3	压力振荡机理分析及抑制措施	171
	参考文献	174

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The Launching Process of Traditional Gun and Its Limitations	1
1.1.1 The new demand set for guns by future war	1
1.1.2 The launching process of conventional guns	4
1.1.3 The inherent limitations of conventional guns	6
1.2 Liquid Propellant and Its Characteristics	8
1.2.1 Limitations of solid propellant	8
1.2.2 Advantage of liquid propellant	9
1.2.3 Demand for liquid propellant using in gun	11
1.2.4 Liquid propellant using in gun and its performance	12
1.3 Liquid Propellant Gun	15
Chapter 2 The Launching Process of Regenerative Liquid Propellant Gun (RLPG)	19
2.1 The Principle of RLPG	19
2.2 The Characteristics of RLPG	21
2.2.1 Structure of RLPG	21
2.2.2 The advantages of RLPG	22
2.2.3 Key technology and difficulties of RLPG	24
2.3 The Developing Introduction of RLPG	27
2.3.1 Development of RLPG	27
2.3.2 Application of RLPG	35

Chapter 3 Zero-dimensional Model of RLPG Launching

Process	46
3.1 Physical Model and Basic Assumptions	46
3.1.1 Physical model of RLPG	46
3.1.2 Basic assumptions	49
3.2 The Model of Ignition Process	50
3.2.1 Physical model of ignition process	50
3.2.2 Transient model of ignition process	51
3.2.3 Combustion model of ignition process	52
3.3 The Spraying, Atomization and Combustion Model of Liquid Propellant	54
3.3.1 Injection model of liquid propellant	54
3.3.2 Atomization model of liquid propellant	56
3.3.3 Combustion model of liquid propellant	58
3.4 The Launching Process Model	58
3.4.1 Governing equation in storage chamber	58
3.4.2 Governing equation in combustion chamber	59
3.4.3 Equation of piston movement	61
3.4.4 Equation of projectile movement	61
3.5 The Optimization Model of Regenerative Spraying Structure	61
3.5.1 Parameter optimization of regenerative spraying structure	62
3.5.2 Optimum control of regenerative spraying process	64

Chapter 4 Zero-dimensional Simulation of RLPG's Launching

Process	69
4.1 Zero-dimensional Simulation of Launching Process and Confirmation	69

4.1.1	Scheme of simulation codes	69
4.1.2	Simulation of firing process and verification	71
4.2	The Influence and Control of Ignition Parameters on Launching Process	73
4.2.1	Effect of igniter parameters on ignition performance	73
4.2.2	Effect of igniter parameters on ballistic cycle	77
4.2.3	Control technology of ignition	80
4.3	The Influence and Optimization of Structural Parameters on Launching Process	82
4.3.1	Parameter optimization of regenerative spraying structure	82
4.3.2	Pressure platform and control	88
4.3.3	Optimum control of regenerative spraying process	92

Chapter 5 One-dimensional Model of RLPG's Launching

	Process	97
5.1	Physical Model and Basic Assumptions	98
5.2	Governing Equation of Gas Phase	99
5.2.1	Transport equation	99
5.2.2	Continuity equation	100
5.2.3	Momentum equation	101
5.2.4	Energy equation	101
5.3	Governing Equation of Droplets	102
5.3.1	Force on droplets in the flow field	102
5.3.2	Equation of droplets motion	104
5.3.3	Combustion equation of droplets	106
5.3.4	Heat transfer equation of droplets	106
5.4	Auxiliary Equation	107
5.4.1	Governing equation in storage chamber	107

5.4.2	Spraying equation of liquid propellant	108
5.4.3	State equation	108
5.4.4	Equation of piston and projectile motion	108
Chapter 6 One-dimensional Simulation of RLPG's Launching		
	Process	110
6.1	Numerical Methods	110
6.1.1	Difference scheme	111
6.1.2	Artificial viscosity	112
6.1.3	Filtering technology	112
6.2	Initial Condition and Boundary Condition	113
6.2.1	Initial condition of gas phase	113
6.2.2	Boundary condition of gas phase	114
6.2.3	Initial condition of droplets	116
6.2.4	Calculation procedure	118
6.3	Numerical Results and Analysis	119
6.3.1	Experiment of regenerative spraying combustion	119
6.3.2	Numerical results	121
6.3.3	Pressure oscillations and analysis	125
Chapter 7 Two-dimensional Two-phase Model of RLPG's		
	Launching Process	128
7.1	Physical Model and Basic Assumptions	130
7.2	The Atomization Model	130
7.2.1	Governing equation in cylindrical coordinates	130
7.2.2	Governing equation of gas phase in arbitrary curvilinear coordinates	131
7.3	Governing Equation of Droplets	134
7.3.1	Modeling the annular jets breakup	136
7.3.2	Initial condition of droplets	139