



国防科技图书出版基金

Test Method and Detection Evaluation
Technology of Water – Projectile
Test After Gun Repaired

火炮修后水弹试验 方法与检测评估技术

傅建平 刘广生 冯国飞 余家武 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

火炮修后水弹试验 方法与检测评估技术

Test Method and Detection Evaluation Technology
of Water – Projectile Test After Gun Repaired

傅建平 刘广生 冯国飞 余家武 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

火炮修后水弹试验方法与检测评估技术/傅建平等编
著. —北京:国防工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-118-10917-7

I. ①火… II. ①傅… III. ①火炮 - 射击试验 - 试验方法②火炮 - 射击试验 - 检测 IV. ①TJ306

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 148348 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 12¼ 字数 245 千字

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 65.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

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 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

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 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 陆军

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

随着我军装备现代化建设的发展,一批牵引火炮、车载炮、轮式自行火炮与履带式自行火炮等新型火炮陆续列装部队,并在部队训练使用、实弹射击中担当重要角色,逐步成为我军炮兵部队的主要装备。新型火炮装备随着射弹数与行驶里程的增加,逐步进入大、中修。火炮大、中修后,火炮修理规程(国军标)明确要求进行修后水弹试验,以综合检验火炮的修后质量。因此,火炮修后水弹试验是对修后火炮质量检验的最为重要的动态检验,只有水弹试验合格的火炮方可供部队训练与射击使用。

目前,新型火炮修后水弹试验遇到以下问题:

(1) 火炮修后水弹试验缺乏理论研究,水弹试验方案缺少理论支撑。尽管我军开展火炮修后水弹试验多年,传统火炮已有较成熟的水弹试验方案与试验方法,但受试验单位技术力量的约束,缺乏开展水弹试验的理论研究,通常,水弹试验方案是建立在大量水弹配重试验基础之上,经不断试验摸索得到的。该方法盲目性大、安全性差、通用性差。某单位曾经在水弹试验中,因试验方案不科学、装水质量不当而引起火炮身管内壁胀膛现象,给水弹试验带来很大的负面影响,该单位曾一度中断水弹试验。

(2) 火炮修后水弹试验检测与评估技术落后。火炮修后水弹试验的检测设备简陋,大多凭目测观察、简单仪表检测水弹试验后的火炮性能,凭经验评估火炮修后技术状态,影响火炮修后水弹试验评估结果和故障诊断的正确性。

因此,急需开展火炮修后水弹试验的理论方法和检测评估技术研究。火炮水弹试验理论方法与水弹试验工程实践是推动火炮水弹试验不断前进的两大动力,两者相辅相成,相互促进。科学的火炮水弹试验理论能为火炮水弹试验工程实践提供理论支撑,使火炮水弹试验实践少走弯路,能够缩短水弹试验的周期、降低水弹试验的成本;同时,火炮水弹试验实践反过来又能不断验证与促进火炮水弹试验理论的不完善。本书的宗旨就在于,总结现有火炮水弹试验工程实践经验,应用现代火炮内弹道学和火炮设计理论,将火炮水弹试验现有经验和知

识提升为较为完整的火炮水弹试验理论,以科学地阐述火炮水弹试验的内弹道和火炮后坐复进运动变化规律,为新型火炮的修后水弹试验提供理论支撑。

全书共分8章。第1章火炮修后水弹试验机理,为水弹试验研究的基础。主要介绍火炮修理制度及修后试验要求;重点介绍火炮水弹试验系统组成、水弹试验及其检测评估技术的现状与发展。第2章火炮修后水弹试验内弹道学,是水弹试验研究的基础。从火炮实弹射击与水弹试验的特点出发,建立火炮水弹试验内弹道计算模型;对火炮水弹试验内弹道参数进行符合计算,以与试验数据相吻合;对水弹试验内弹道进行影响因素分析。第3章火炮修后水弹试验装水质量确定方法,为开展水弹试验提供其核心参数。主要介绍膛合力、膛合力冲量等概念及其计算方法;建立基于冲量原理的水弹试验装水质量计算模型,以及装水质量计算的方法和步骤。第4章火炮修后水弹试验动力学分析,分析结果是评估火炮水弹试验的关键参数。以火炮水弹试验时后坐部分为受力分析对象,建立火炮水弹试验时火炮后坐与复进运动计算模型,从而得到火炮后坐与复进运动的位移和速度。第5章火炮修后水弹试验安全性研究,它是火炮水弹试验的前提。应用火炮设计理论,介绍火炮水弹试验时的内膛理论压力和身管实际强度的计算方法,从而引入火炮水弹试验身管安全性评估的方法与步骤。第6章火炮修后水弹试验检测技术,它是火炮水弹试验的重要组成部分,为水弹试验评估和故障诊断提供数据。主要介绍基于传感技术的接触式测试系统和基于图像匹配技术的非接触式测试系统。第7章火炮修后水弹试验评估和故障诊断技术,为水弹试验的最终目的,介绍水弹试验模糊评估方法和火炮后坐与复进运动故障诊断方法。第8章火炮修后水弹试验规范,这是水弹试验研究的落脚点。

本书全面系统地介绍了火炮修后水弹试验的理论方法及其试验检测与评估技术,在继承基于实弹射击的火炮内弹道学、火炮射击动力学、火炮炮身强度理论、火炮测试技术、火炮试验评估与诊断等理论与技术基础上,根据火炮水弹试验的要求与特点,综合了多年来取得的火炮水弹试验相关科研成果,因而具有时代特色和先进性;本书将实弹射击与水弹试验相比较,构建了一套较为完整的火炮修后水弹试验理论方法以及检测评估技术,火炮水弹试验理论性强、通用性好;本书将火炮水弹试验的理论与工程实践相结合,具有很强的实用性,既可供从事火炮设计、制造、试验和修理的科技人员使用,也可作为院校教学的参考书。

本书的撰写和出版过程中曾得到国防科技出版基金评审委员会和国防工业出版社的关心与帮助,承蒙钱林方教授和李冰研高工对本书初稿进行评阅并提出宝贵意见。在本书所涉及的研究内容中,原济南军区保障大队的吕世乐工程

师和本单位张泽峰研究生参加了火炮修后水弹试验的内弹道计算和检测技术等部分内容研究;驻国营 157 厂军事代表室和国营 157 厂为本书提供了许多火炮水弹试验的技术资料和技术支援,其中刁中凯高工、李雷工程师为本书研究提出了宝贵建议;中国人民解放军第三二零二工厂、六四一零工厂为本书提供了火炮修后水弹试验实例及试验结果;本教研室的许多教授专家对本书初稿提出了许多有益的修改意见。在此,对以上单位和同志的大力支持和辛勤劳动一并表示衷心感谢。

由于成书仓促,作者水平有限,若干研究工作目前仍在继续进行中,故本书的缺点和错误在所难免,作者也衷心期望得到读者的批评指正。

作者

2016 年 6 月于石家庄

目 录

第 1 章 火炮修后水弹试验机理	1
1.1 火炮修后试验概述	2
1.1.1 火炮人工后坐试验	2
1.1.2 火炮实弹射击试验	3
1.1.3 火炮水弹试验	4
1.2 火炮水弹试验系统组成	4
1.2.1 试验火炮	5
1.2.2 装药	6
1.2.3 水弹	8
1.3 火炮水弹试验要求与依据	10
1.4 火炮水弹试验过程分析	11
1.4.1 水弹膛内的高速运动	11
1.4.2 火炮后坐与复进运动	12
1.4.3 木塞与水柱的膛外运动	12
1.5 火炮水弹试验现状	15
1.5.1 火炮新品实弹射击试验	15
1.5.2 火炮新品砂、水弹试验	15
1.5.3 火炮修后水弹试验	16
1.6 火炮水弹试验测试技术	17
1.6.1 基于传感器测试的接触式检测研究	17
1.6.2 基于视频图像相关原理的非接触式检测研究	18
1.7 火炮故障诊断技术研究动态	20
1.7.1 故障诊断技术的基本概念	20
1.7.2 故障诊断技术的发展状况	21

第2章 火炮修后水弹试验内弹道学	25
2.1 火炮水弹试验内弹道时期	26
2.2 火炮水弹试验内弹道计算模型	27
2.2.1 基本假设	27
2.2.2 计算模型	28
2.3 木塞启动压力与次要功系数	35
2.3.1 木塞启动压力台架试验	35
2.3.2 木塞启动压力符合计算	37
2.3.3 次要功系数	37
2.4 内弹道分析计算方法	38
2.4.1 内弹道计算方法	38
2.4.2 内弹道特殊点的计算方法	39
2.5 内弹道符合计算	41
2.5.1 逐步逼近法	41
2.5.2 基于遗传算法的内弹道参数优化方法	43
2.6 火炮修后水弹试验内弹道结果分析	47
2.7 火炮水弹试验影响因素分析	50
2.7.1 装水质量	51
2.7.2 木塞挤进压力	51
第3章 火炮修后水弹试验装水质量确定方法	53
3.1 冲量与冲量原理	54
3.2 炮膛合力	55
3.2.1 弹丸沿膛内运动时期的炮膛合力	56
3.2.2 火药气体后效期的炮膛合力	58
3.2.3 计算结果与分析	58
3.3 炮膛合力冲量	60
3.4 结论	61
第4章 火炮修后水弹试验动力学分析	63
4.1 后坐运动分析	64

4.2	后坐阻力计算	65
4.2.1	制退机液压阻力	65
4.2.2	复进机力 F_f	67
4.2.3	常力计算	68
4.3	复进运动分析计算	69
4.3.1	复进运动计算模型	70
4.3.2	复进机力	72
4.3.3	液压阻力	72
4.3.4	常力计算	73
4.4	实例分析	73
第5章	火炮修后水弹试验安全性研究	77
5.1	火炮修后水弹试验内膛理论压力	78
5.1.1	高低温平均压力曲线	78
5.1.2	膛底压力 p_t 、弹底压力 p_d 与平均压力 p 之间的关系	80
5.1.3	考虑膛内压力分布时的压力曲线	81
5.1.4	考虑装药初温影响时的高低温压力曲线	82
5.1.5	考虑安全系数时的理论内压曲线	83
5.2	火炮水弹试验时身管实际强度	85
5.2.1	单筒身管弹性强度极限	85
5.2.2	自紧身管理论强度极限	87
5.2.3	身管实际强度曲线	91
5.3	火炮修后水弹试验安全性评估	92
第6章	火炮修后水弹试验测试技术	95
6.1	基于传感技术的接触式测试系统	96
6.1.1	传感器	97
6.1.2	数据采集分析系统	99
6.1.3	传感器测试数据预处理	101
6.2	基于序列图像匹配技术的非接触式测试系统	104
6.2.1	火炮发射高速摄像系统	105
6.2.2	测试方法步骤	108

6.2.3	火炮发射视频图像预处理	110
6.2.4	火炮发射单帧图像匹配技术	118
6.2.5	基于直线特征及模板倾斜修正的图像匹配定位	124
6.2.6	火炮发射单帧图像匹配加速方法	130
6.2.7	亚像素相关匹配技术	135
6.2.8	火炮发射序列图像匹配定位	138
6.2.9	测试数据分析处理	143
第7章	火炮修后水弹试验评估与诊断技术	147
7.1	反后坐装置状态动态模糊评估	148
7.2	智能故障诊断技术	151
7.2.1	基于符号推理的故障诊断	152
7.2.2	基于数值计算的故障诊断	152
7.3	反后坐装置智能故障诊断	154
7.3.1	复进机故障诊断	154
7.3.2	制退机故障诊断	157
第8章	火炮修后水弹试验规范	167
8.1	火炮修后水弹试验目的与要求	168
8.2	受试品、参试品与试验场地	168
8.3	火炮修后水弹试验方法步骤	169
8.3.1	火炮修后水弹试验准备工作	169
8.3.2	火炮修后水弹试验步骤	170
8.4	火炮修后水弹试验要求	170
8.5	火炮修后水弹试验检查与记录	171
8.5.1	试验后检查项目	171
8.5.2	试验记录	172
8.6	火炮修后水弹试验安全注意事项	172
参考文献		173

Contents

Chapter 1 Principle of gun water – projectile firing test after repairing ... 1

1.1	Summarize of gun test after repairing	2
1.1.1	Test of manpower recoil	2
1.1.2	Gun live ammunition firing test	3
1.1.3	Water – projectile firing test	4
1.2	Components of gun water – projectile firing test system	4
1.2.1	Gun	5
1.2.2	Gunpowder	6
1.2.3	Water – projectile	8
1.3	Demand and basis of water – projectile firing test	10
1.4	Process of water – projectile firing test	11
1.4.1	High Speed movement of Water – projectile in the bore	11
1.4.2	Recoil and counter rewil movement of the gun	12
1.4.3	Cork and water column movement outside bore	12
1.5	Current situation of gun water – projectile test	15
1.5.1	Verification of new gun about live ammunition firing test	15
1.5.2	Verification of new gun about sand and water projectile firing test	15
1.5.3	Verification of gun water – projectile firing test after repairing	16
1.6	Test technology of gun's firing test	17
1.6.1	Contacting test study based on sensor	17
1.6.2	No contacting test study based on video image	18
1.7	The Present state of fault diagnosis technology	20

1. 7. 1	The basic concept of fault diagnosis technology	20
1. 7. 2	The developing state of fault diagnosis technology	21
Chapter 2 Gun interior ballistic study of water – projectile firing test ...		25
2. 1	Interior ballistic period of gun water – projectile	26
2. 2	Calculated model of interior ballistic	27
2. 2. 1	Basic suppose	27
2. 2. 2	Calculated model of interior ballistic	28
2. 3	Cork starting pressure and secondary power coefficient	35
2. 3. 1	Bench test of cork starting pressure	35
2. 3. 2	According calculation of cork starting pressure	37
2. 3. 3	Secondary power coefficient	37
2. 4	Analysing calculation of interior ballistic	38
2. 4. 1	Calculation of interior ballistic	38
2. 4. 2	Calculation of special point	39
2. 5	According calculation of interior ballistic	41
2. 5. 1	Step – by step method	41
2. 5. 2	Genetic algorithm optimization method based on the interior ballistic parameters	43
2. 6	Analysis of interior ballistic results about water – projectile	47
2. 7	Analysis of impact factors about water – projectile firing test	50
2. 7. 1	Amount of water mass	51
2. 7. 2	Change of the bore pressure based on the cork into pressure	51
Chapter 3 Method for determining mass of gun water – projectile		53
3. 1	Impulse and the principle of impulse	54
3. 2	The bore's composition of forces	55
3. 2. 1	The bore's composition of forces about the projectile movement along the bore	56

Contents

3.2.2	The bore's composition of forces about the propellant gas after effect period	58
3.2.3	The calculation results and analysis	58
3.3	Impulse of the bore's composition of forces	60
3.4	Conclusion	61
Chapter 4	Dynamics of gun water – projectile firing test	63
4.1	Analysis of recoil movement	64
4.2	The drag calculation of recoil	65
4.2.1	The hydraulic resistance of recoil mechanism	65
4.2.2	Counter recoil's force	67
4.2.3	Calculation of the constant force	68
4.3	Analysis and calculation of the complex motion	69
4.3.1	The calculation model of the complex motion	70
4.3.2	Counter recoil's force	72
4.3.3	The hydraulic resistance	72
4.3.4	Calculation of the constant force	73
4.4	Analysis of example	73
Chapter 5	Safety of gun's water – projectile firing test	77
5.1	Bore theoretical pressure of gun water – projectile firing test	78
5.1.1	Curve of average pressure about high and low temperature	78
5.1.2	The relationship among breech pressure P_t , pressure of projectile bottom P_d and average pressure P	80
5.1.3	Curve of pressure considering the pressure distribution in bore	81
5.1.4	Curve of pressure about high and low temperature considering the influence of gunpowder initial temperature	82
5.1.5	Curve of bore theoretical pressure considering safety coefficient	83
5.2	The actual strength of tube	85

5.2.1	Elastic strength limit of single cylinder barrel	85
5.2.2	Theoretical strength limit of auto - frettaged tube	87
5.2.3	Curve of the actual strength of tube	91
5.3	Checking the strength of tube in the water - projectile firing test	92
Chapter 6	Testing technology of gun water - projectile firing test	95
6.1	Contacting test system based on sensing technology	96
6.1.1	Sensor	97
6.1.2	Data acquisition and analysis system	99
6.1.3	Data preprocessing of sensing test	101
6.2	No contacting test system based on image matching technology	104
6.2.1	High speed camera system of gun's firing	105
6.2.2	Test method procedures	108
6.2.3	Video image pretreatment of gun's firing	110
6.2.4	Single frame image matching technology of gun's firing	118
6.2.5	Image matching technology based on line feature and the tilt of template updating	124
6.2.6	Single frame image matching accelerating method of gun's firing	130
6.2.7	Sub pixel relative matching technology	135
6.2.8	Image matching location of gun's firing sequence	138
6.2.9	Analysis and processing of test data	143
Chapter 7	Evaluation and diagnosis technology of gun water - projectile firing test	147
7.1	Dynamic fuzzy evaluation of recoil device status	148
7.2	Intelligent fault diagnosis technology	151
7.2.1	Fault diagnosis based on symbolic reasoning	152
7.2.2	Fault diagnosis based on numerical calculation	152
7.3	Intelligent fault diagnosis of recoil device	154