

《近代兵器力学》丛书

火炮身管强度设计理论

Strength Design Theory On Gun Tube

曾志银 张军岭 吴兴波 编著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

火炮身管强度设计理论/曾志银等编著. —北京:国防工业出版社, 2004. 1

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-03221-2

I. 火... II. 曾... III. 炮身-强度-设计
IV. TJ303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 072915 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7¼ 176 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1-2500 册 定价: 21.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

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

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	殷鹤龄			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)				
	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

《近代兵器力学》丛书组织结构 编辑委员会

主 任 委 员 蓝祖佑

副 主 任 委 员 陈鹏飞 杨葆新 李魁武

委 员 马春茂 王玉林 王光华 朵英贤

(按姓名笔画排序)

刘 铭 杨楚泉 来渝生 吴三灵

邱晓华 胡国强 恽寿榕 徐明友

崔士义

编 辑 部

主 编 朵英贤 马春茂

副 主 编 吴三灵 杨楚泉 恽寿榕 徐明友

责任编辑 康新中

序

力学作为一门工程技术的重要基础学科,在各行各业得到了广泛应用,现已发展成为多种类别的应用力学,兵器力学就是其中之一。建国以来尤其是近二十年来,兵器工业在基础研究、预先研究以及型号研制等方面取得了突破性进展,很多科研成果达到了国内外先进水平,也积累了不少经验和教训。为了总结、升华已有的科研成果,使之形成新的、系统的兵器力学理论体系,推动今后兵器科研和设计理论的发展,跟踪国际先进水平,我们编纂出版了这套《近代兵器力学》丛书。

《近代兵器力学》丛书共 14 册,从力学角度覆盖了兵器系统的典型力学问题,总结了国内外装甲车辆、火炮与自动武器、弹道、爆炸与冲击等力学方面的成就。每一册都是由各专业领域内具有丰富实践经验和较高学术水平的专家学者进行撰著。本套丛书不仅包含了理论研究还有试验研究,重点突出了相关专业领域内的新理论、新原理和新技术的发展,基本反映了当前国内外兵器发展中应用工程力学的广度和水平,具有较高的理论水平和工程应用价值。

1998 年冬,中国工程院院士朵英贤倡议编纂本套丛书,首先得到国防科技图书出版基金委员会办公室的支持,也得到中国兵器工业第二〇二研究所的积极响应并承担组织工作。经过专家学者们两年来的辛勤劳动,《近代兵器力学》丛书正式开始出版,这是一件很有意义的事情,得到了各级领导的重视和支持,受到了广大兵器科技工作者的欢迎;这一套丛书的出版必将从力学理论基础

到工程实践应用都给现代兵器的研制提供理论的指导方向,必将对兵器研制的现代化起到积极的推动作用。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Li Rui, the Chinese Vice President at the time. The characters are fluid and cursive.

2001 年元月

序

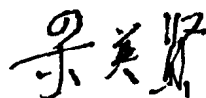
自从戈矛进化到火器,兵器(不论是枪械、火炮、坦克、战术火箭和导弹)便以发射抛射物来毁伤目标。发射动力主要来源于火药,毁伤能量主要靠抛射物的动能或是炸药含能(直接爆炸或抛出毁伤元)。能量的转换便以内弹道、外弹道、终点弹道递次进行。兵器的载体可以不同,如陆地、战车、飞机、舰船等,这种能量转换模式却不改变。发射抛射物直到对目标的毁伤是一种大功率高瞬态的能量转换。弹丸对目标的撞击、炸药爆炸、内弹道、外弹道等则是纳秒、微秒、毫秒级的过程。发射时兵器本身也受到高强度的激励。自从经典内弹道学建立的 100 多年来,随着火药力和炸药能量的提高,这种特征日益明显,并以高瞬态的力学过程映射出来,也就日益有别于其它工程领域。有人说,兵器领域是“瞬态力学大户”,此言不虚!本套《丛书》归纳了 20 世纪后叶兵器力学的主要成果,其中不乏我国学者的贡献。每个分册的作者都是该领域中卓有成效者。

工程实践和理论基础是兵器发展的两个巨轮,而理论基础则依赖于对工程实践的认识和提高,并用以指导后期的工程实践。20 世纪 60 年代,我国兵器已进入自行研制,那是鄙薄技术最严重的时期,漫长的岁月,理论工作被荒芜,很多在工程中已成功的经验不能总结升华,这给兵器力学的发展带来严重后果,也给兵器发展带来不利影响。所幸的是改革开放以来,已有很大的弥补,《丛书》中相当的篇幅是这一时期的结晶。毕竟,研究瞬态力学有很大的难度,过程短暂、幅值很高、频域很宽、非线性问题多、信号采集困难、费用消耗大等因素制约着发展。即使这样,经过 20 多年的知识积淀及相邻学科的带动,给设计观念带来很大的变化,并运用

于产品研制。但是,也要看到这套《丛书》只是反映了兵器力学中的一部分。譬如,动态强度篇幅较少,在高速碰撞下材料的特性如何变化尚处于假设。工程中存在的“应力腐蚀”、“氢脆”、镀层强度等力学问题,须在更微观层次中进行研究。兵器中已大量应用非金属材料,但本构关系不甚清楚。至于用力学来描述高速破片对目标的创伤过程,目前远不成熟,等等。现在,纳米技术已进入社会,也逐步贴近兵器,那么兵器这种通过高爆能量转换和高动力发射的模式,会不会成为应用纳米技术使武器小型化的障碍?兵器力学中真有无完没了的事情,任重道远!

如此说来,这套《丛书》只是一个开头,希望这项工作能够获得延续。我希望兵器力学研究的现状能够得到改进,使它发挥应有的推动作用。

中国工程院院士



2000 年 12 月

前 言

从 20 世纪 60 年代末开始,机械领域相继出现了一系列新的设计理论与方法。为了区别于过去的传统设计理论与方法,人们常把这些新兴的理论与方法称为现代设计方法。本书介绍现代设计理论在身管设计中的应用。

长期以来,火炮身管设计一直沿用传统的材料力学方法进行静强度设计。由于静强度理论不考虑材料性能、结构尺寸及载荷大小的随机性,不考虑载荷随时间的作用历程,不考虑结构或材料实际存在的缺陷,因而不能回答所设计的身管在多大程度上是安全可靠的,不能解释身管低应力脆断一类问题。这表明身管静强度设计理论已不能精确满足火炮工程开发的要求,必须开展新的身管强度设计理论的应用研究,以补充身管静强度设计理论的不足。本书正是根据这一目的而编写的。

现代设计理论,以提高产品质量为核心,以概率论、数理统计理论为基础,综合运用工程力学、机械工程学、计算机等多学科的知识来研究机械结构强度和寿命的最佳设计问题。目前,静强度、疲劳强度、断裂强度等和可靠性理论的有机综合,已成为机械强度设计的重要发展方向,也是身管强度设计的重要发展方向。

本书是根据作者的科研成果和实践经验进行撰写的,同时充分融入了他人的最新研究成果。全书共五章,依次为身管静强度可靠性设计、身管疲劳强度设计、身管断裂强度设计、液压自紧身管强度设计和身管疲劳寿命的试验研究。第一章至第四章由曾志银编写,第五章由张军岭编写,吴兴波参加了第一章编写工作。全书由曾志银统稿。

在本书引用的研究成果中,包含了霍志琴高级工程师、山志超

高级工程师、韩宏潮高级工程师、王胜利高级工程师、朱德发高级工程师以及其他同行的辛勤劳动,在此,作者一并表示致谢。

作者对在本书编写过程中给予大力支持的马春茂教授、吴三灵教授深表谢意。康新中教授、卫丰教授在百忙之中通读了全部书稿,并提出许多中肯的建议,宁变芳工程师在书稿的编辑排版方面给予了帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作 者

2003 年 4 月

内 容 简 介

本书是作者总结自己多年科研成果和工程实践经验,并融入他人最新科研成果而精心撰写的一本专著。全书较系统地介绍了现代强度设计理论在火炮身管设计中的应用。全书共五章,内容依次为:身管静强度可靠性设计,身管疲劳强度设计,身管断裂强度设计,液压自紧身管强度设计和身管疲劳寿命的试验研究。

本书可供从事火炮及武器系统开发的工程技术人员参考,亦可供高等院校相关专业的教师和研究生参考。

Summarized their scientific outcome and practical experience, the author wrote the books. It systematically introduced the strength design theory on the gun-tube. The wholly-book included five chapters, reliability static strength design on gun tube, fatigue strength design on gun tube, fracture strength design on gun tube, hydraulic autofrettaged strength design on gun tube and research of testing on gun tube fatigue life.

The books will be provided for the researchers engaged in gun tube and systematic research of weapon system. It also can be used as a reference book on relevant subjects for teachers and postgraduates.

目 录

第一章 身管静强度可靠性设计	1
1.1 设计参数的统计分布	1
1.1.1 统计数据的获取途径与可靠程度	1
1.1.2 材料的静强度统计分布	2
1.1.3 几何尺寸的统计分布	2
1.1.4 静载荷的统计分布	2
1.2 应力—强度干涉模型理论	5
1.2.1 求可靠度的一般表达式	5
1.2.2 应力和强度为正态分布型时的可靠度计算	9
1.2.3 应力和强度为非正态分布型时的可靠度计算	12
1.2.4 求可靠度的其他工程方法	13
1.2.5 安全因数与可靠度的关系	18
1.2.6 随机变量函数的均值和标准差的近似计算	22
1.3 身管静强度设计	23
1.3.1 身管静强度设计的特点	23
1.3.2 最大压力曲线的确定	24
1.3.3 身管理论强度曲线的确定	27
1.3.4 身管静强度设计的一般步骤	29
1.3.5 单筒身管静强度设计举例	30
1.4 身管静强度的可靠性设计	36
1.4.1 计算最大压力曲线的统计分布	36
1.4.2 计算理论强度曲线的统计分布	37
1.4.3 求均值安全因数	38
1.4.4 身管静强度可靠性设计的一般步骤	38
1.4.5 身管静强度可靠性设计举例	39

1.5 身管静强度可靠性设计需要深入研究的几个问题	41
1.5.1 身管静强度可靠性指标的确定	41
1.5.2 最大设计压力曲线的统计分布计算	42
1.5.3 身管理论强度极限曲线的统计分布计算	42
参考文献	43
第二章 身管疲劳强度设计	44
2.1 疲劳强度的基本概念	44
2.2 疲劳破坏的特征和断口分析	45
2.2.1 疲劳破坏的特征	45
2.2.2 断口分析	47
2.3 交变应力	49
2.4 材料的疲劳极限与疲劳极限曲线	52
2.5 影响构件疲劳极限的因素	56
2.6 几个特殊疲劳问题	61
2.6.1 对称循环下构件的疲劳强度计算	61
2.6.2 非对称循环下构件的简化疲劳极限曲线	62
2.6.3 非对称应力循环疲劳强度计算	64
2.7 疲劳强度理论在身管设计中的应用	66
2.7.1 裂纹扩展速率	66
2.7.2 疲劳寿命估算	67
2.7.3 构件检修周期	70
2.8 疲劳损伤及累积损伤理论简介	70
参考文献	74
第三章 身管断裂强度设计	75
3.1 断裂力学概述	75
3.2 脆性断裂理论——能量释放率	78
3.3 线弹性断裂力学理论	79
3.3.1 应力强度因子	79
3.3.2 小范围屈服时的线弹性断裂力学	81
3.3.3 线弹性断裂力学断裂判据	84
3.4 应力强度因子的计算与实验测定	86

3.5 断裂韧性的测试和影响因素	90
3.5.1 平面应变断裂韧性	90
3.5.2 平面应力断裂问题	92
3.6 疲劳裂纹扩展与寿命计算	96
3.6.1 疲劳裂纹亚临界扩展规律	96
3.6.2 影响疲劳裂纹扩展的因素	97
3.6.3 疲劳裂纹扩展寿命计算	102
3.7 断裂力学在火炮身管设计中的应用	103
3.7.1 断裂力学在火炮身管设计中的应用基础	103
3.7.2 断裂力学在火炮身管设计中的应用实例	106
参考文献	109
第四章 液压自紧身管强度设计	110
4.1 概述	110
4.2 自紧技术的基本理论	110
4.2.1 材料模型	110
4.2.2 自紧残余应力分析中两个常用的屈服条件	113
4.2.3 厚壁圆筒在两种屈服条件下的弹性极限压力	114
4.3 理想弹塑性材料模型下的残余应力	117
4.3.1 Tresca 屈服准则下的残余应力表达式	117
4.3.2 Mises 屈服条件下的残余应力表达式	122
4.4 半精加工后自紧身管的残余应力解析解	130
4.5 考虑加卸载线性强化及鲍辛格效应的残余应力解析解	132
4.5.1 加载塑性区应力	133
4.5.2 加载弹性区应力	135
4.5.3 卸载屈服区应力	136
4.5.4 卸载弹性区应力	139
4.5.5 残余应力最终表达式	140
4.5.6 残余应力解析解的实验验证	141
4.6 自紧身管的强度设计	143
4.6.1 身管自紧后不再加工时的弹性极限压力	143
4.6.2 自紧身管加工后的弹性极限压力	144

4.6.3 自紧身管强度的安全因数求法	158
4.7 自紧身管残余应力释放规律简介	159
参考文献	165
第五章 身管疲劳寿命的试验研究	166
5.1 身管疲劳试验概述	166
5.2 身管疲劳裂纹扩展速率的测定	168
5.2.1 裂纹扩展速率的测试方法及原理	168
5.2.2 身管疲劳寿命试验	169
5.2.3 迹线法中迹线时机的确定	172
5.3 身管疲劳试验结果处理及分析	175
5.3.1 迹线宽度的处理方法	175
5.3.2 疲劳寿命试验结果分析	177
5.4 身管疲劳试验举例	183
5.4.1 试件准备	183
5.4.2 试验及结果处理	184
参考文献	208