

强冲击试验 与测试技术

吴三灵 李科杰 张振海 苏建军 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

强冲击试验与测试技术

吴三灵 李科杰 张振海 苏建军 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书简明系统地论述了强冲击试验与测试的相关理论、试验装置、各种试验及测试方法,并介绍了多种工程应用实例。全书共分8章:概述;强冲击试验相关理论;材料和构件对强冲击载荷的响应;强冲击基本参数的采集与处理方法;材料动态性能试验与测试;工程应用及校准技术等。书中介绍的内容反映了当今有关强冲击试验与测试技术的最新成果,并结合工程在研项目给出了应用实例。

本书可供从事武器系统研制、材料动力学行为研究、强冲击试验与测试等领域的科技人员参考,并可作为大专院校相关专业教师和研究生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

强冲击试验与测试技术 / 吴三灵等编著. —北京:
国防工业出版社, 2010. 6
ISBN 978 - 7 - 118 - 06803 - 0

I. ①强... II. ①吴... III. ①冲击试验②冲击(力学)
)-测试 IV. ①TB302. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 077194 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 19¼ 字数 350 千字

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

序

吴三灵先生又一部力作面世了。

强冲击是一种高瞬态自然现象,屡见不鲜,如空间飞行物相撞,太阳风抚过,空中飞机相撞,闪电激发,地球上火车相撞,物理中粒子飞撞是寻常事情。生产建设中,强冲击比比皆是,深孔打桩,高速锻造,爆炸成型。战争中有炸药爆炸,炮弹穿甲,激光毁伤。强冲击的特点是能量密度特高,能量转换时间极短,而能量在介质中是以复杂的波动传递。因此,强冲击的研究是一个世界性难题,由于它的重要性,各国投资很大。强冲击过程因伴有相变现象,研究的特点是理论和试验兼行。因属于高瞬态过程,要用高精度高频响的检测系统作为工具。所以,对强冲击的研究始终伴随着物理的进步和设备的演进,难度很大。

三灵兄是一位资深的力学专家,专于固体力学、振动学,又擅长动态测试,在他从事火炮动力学研究和动态测试的40多年中,率领团队力破型号研制中的关键难题,成果丰硕,加上及时总结,已出版理论性和实用性很强的多部优秀著作。这本书是他研究固体中强冲击试验的近作,以综合实力来讲,该书的出版也非他莫属。但强冲击的研究远没有完结,还要走好长的路才能驾驭它,《强冲击试验与测试技术》无疑是一个新台阶。

我和三灵兄相识已有30多年,是缘于同行操戈。他专注广泛的力学研究,在文化大革命中开始从业,那是国内群魔乱舞,走向混沌的年份,他所在的研究所也被风暴颠得疲惫不堪。在那种环境下,没有蹉跎年华,默默耕耘,打造自己的环境和基础,等到我去他那里取经时,他的动力学实验室已远远翘楚整个行业,身旁已经有了一个很强很有朝气的创新团队。给我的印象是要建这样的团队,要赶上这样的人气,很难。他的魅力是对待朋友和部属总是一个“诚”,自己不张扬却很勤奋,大家都亲切地称呼“三灵”,叫名不叫姓是中国人的一种亲近。年龄比我轻许多,人文情怀却与我情投意洽,长于诗词以抒发情感,没有对生命的感悟,哪有诗兴降临!现在他游刃于物质与精神之间,想架起一座桥梁,有一名句言,早年前曾告诉过好友:“劝君深究强冲击,事理看破人不慌”,这话既有哲理,也有诗意。

研究物质中强冲击既久,对于这种过程在他的意识中已抽象成某种图像或符号。他或许认为,人如果在精神上受到某种强冲击,像美国“9·11”事件,抽象出来的图像或符号与物质强冲击有一定的相似性。直到现在我还没有参透这两者之间在何种条件下有相似性,如果能够成立,人在其生命的长河中就不会被动和无奈。他给我的启示犹如巴勒斯坦人在走出埃及时,经常受到上帝的启示而不能领悟。忽然想起钱学森大师也有两句颇为相似的话:“事理看破胆气壮,文章得意心花开”,问题是我性鲁钝,暂时未能参透。三灵兄的强冲击也要继续走上新航程,一面丰富着对强冲击的感受,一面进一步探索着物质与精神间的关联,架起一座桥梁,丰富人类对世界的认识,对此我极有兴趣。

果戈贤

2009.12.31北京

附：吴三灵赋诗一首：喜读朵英贤院士“序”文，心情澎湃，为院士“序”言而作。

收 成

一

辛劳人生满，
心愿能几许？
新愁接踵来，
心事常萦纡。

二

人生知何似？
飞鸿踏雪泥。
日久见人心，
路遥知马力。

三

求是莫畏难，
无山不可登。
点滴作努力，
满仓获收成。

序

强冲击是一种常见的军事现象和自然现象,随着国防工业、国家建设、科学技术的发展,大量复杂的强冲击问题越来越突出,它的深入研究对我国武器装备和国防科技的发展有着十分重要的意义。和一切客观存在的事物一样,强冲击也有两面性,不利面和有利面,破坏面和建设面。逐步深入地研究强冲击现象发生的条件,强冲击过程的客观规律,强冲击对结构、构件产生的损伤和破坏机理,就能够采取有效措施防止、减轻、抑制它对人类带来的危害。同时,又可以利用其规律增强人们趋利驱弊和改造世界、造福人类的能力。

强冲击往往与爆炸、高压、高速、高过载、瞬变、巨能瞬间释放联系在一起,大都呈现出极端条件下的物理过程。在极端条件下物质的性态与常态下是极不相同的,可能会出现新的性质,这是 21 世纪材料、构件、结构动力学行为研究的前沿领域之一,它具有极大的难度和多学科交叉耦合的极其复杂性,需要在理论研究、试验研究以及两者有机结合条件下、进行深入系统的研究。强冲击机理研究,材料及构件高速撞击动力学行为研究,试验及测试技术研究在上述前沿领域中都占有非常重要的地位,它是发现新规律、确定冲击波参数、建立材料状态方程的唯一途径。

试验及测试技术研究主要包括产生动态变形的装置研究,高压技术研究,试验、测试系统及方法研究,脉冲信号数据处理技术研究,研究内容非常广泛。

吴三灵等科技人员多年来一直从事强冲击试验及测试技术研究,包括弹载元器件、引信、航空数据记录仪、导弹弹头硬目标侵彻、贯穿、各种强冲击试验装置、传感器、存储技术、高 g 值校准装置、数据处理等技术研究,取得了多项科研成果。作者在实际研究开发工作中所采用的、并已得到成功应用、实践证明更有效的、代表目前强冲击试验及测试水平的研究内容都收集于本书中。愿这本专著的出版能为广大科技工作者在科学研究中提供参考,对强冲击试验及测试技术的开发起到积极的推动作用。

郑子平
2009.12.16

《心是吟》五首

吴三灵

勤 思

志在攀高峰，
心谋征途行。
勤思开智源，
肯干事业成。

在 路 上

火炮力学二七载^①，
历时荣枯在心上。
喜看新辈势头足，
辛辛苦劳在路上。

国 是 吟

艰难历程四二载^②，
功过是非一笔销。
余生定标国是吟^③，
不遗余力达此标。

① 1983年兵器工业二〇二所成立火炮工程力学室，我曾历任副主任、主任多年，至今已27年。

② 1968年7月我从西安交通大学应用力学专业毕业参加工作，始在丹阳湖农场锻炼，1970年到二〇二所工作至今已42年。

③ 现今已离开工作岗位，筹划出版《国是吟》诗集。

人 生

人生何事不相遇，
坦然面对莫怯怯。
顺境之中莫忘形，
逆境之中持不懈。
逆境顺境人生道，
淡然处之莫急切。
路程遥遥人需静，
宁静致远万难解。

强冲击与九一一

——为《强冲击试验与测试技术》一书而作

—

世贸中心摩天高，
纽约地标筑辉煌。
二〇〇一九一一，
恐怖袭击美遭殃。
一机时速八百里，
世贸北楼遭重创。
另机时速千余里，
猛撞南楼谁能防。

二

高速冲击动能大，
极端条件实难抗。
楼势孤高姊妹花，
轰然倒塌人惶惶，
曼哈顿岛烟尘布，
三千精英生灵亡。
拉登滥用强冲击，
惊破白宫乱嚷嚷。

三

小小寰球美为大，
太岁头上动刀枪！
全球反恐由此始，
恐怖分子何处藏！
时下我劝奥巴马，
反恐重任岁月长。
劝君深究强冲击，
事理看破人不慌。

前 言

随着国家建设、国防工业、科学技术的发展,大量复杂的强冲击问题急需研究。强冲击是一种极端条件下的物理现象,它的深入研究尤其对我国武器装备和国防科技的发展有着十分重要的意义;制导武器如导弹、制导炮弹、制导炸弹、制导地雷是用于攻击主战坦克、装甲战车、坚固火力点等地面近距离点目标,这几类武器不仅要求命中精度高,而且必须有能力摧毁目标,导弹战斗部对目标的击穿和毁伤是典型的强冲击问题;硬目标侵彻武器的强冲击装置、试验方法、测试和校准系统的研究关系到硬目标侵彻新型武器的研制,新武器性能指标的实现;在硬目标侵彻武器的研制、定型、交验及生产中,必须相应地研究等效试验、测试方法和测试系统来检测武器系统的质量和效能,检查炸点控制系统是否能符合战术技术要求,其新型炸药是否能满足装药结构抗高过载和安全性、可靠性的要求;强冲击与爆炸、高速、瞬变、巨能瞬间释放往往联系在一起,这些大都是极端条件下呈现出的物理现象。在极端条件下研究物态的性质及其变化规律是 21 世纪物理学研究的前沿领域之一。

本书是根据作者长期从事强冲击理论研究和试验研究,在负责多种型号产品强冲击试验与测试以及强冲击装置、有关强冲击预研项目研究的基础上加以提炼和总结而撰写成的,书中还充分融入了国内外该研究领域的最新成果。主要内容包括:强冲击试验的内涵;强冲击作用下的弹塑性波理论;材料和构件对强冲击载荷的响应;强冲击基本参数的采集与处理方法;材料动态性能试验与测试;强冲击试验装置以及强冲击试验的工程应用。

本书在简略介绍有关强冲击基本理论的基础上,详尽地介绍了各类强冲击试验装置、测试方法、数据采集与处理方法。在内容选材上突出了工程背景、实用性和新颖性,力求对读者有所启迪。

本书结构框架、内容范围由吴三灵提出,并主笔和统校全书文稿;第 4 章、第 6 章主要章节内容由张振海编著;第 7 章主要章节内容由李科杰、张振海编著;第 8 章由苏建军编著。

感谢中国工程院院士朵英贤先生对本书编著工作的关注、指导和为本书作序。

X

序文矜奇立异,玉振金声,笔有余力,沁人肺腑。感谢中国兵器工业第二〇二研究所郑广平所长为本书作序以及对本书编著出版工作的支持,感谢西安交通大学何正嘉教授和西北工业大学姜节胜教授对本书部分文稿的审阅及提出有益的修改意见。

本书引用了许多专家学者的著作与论文,在此表示谢意。书中引用了包括王宝元、牛宇浩、郭旻、朱德发、陈彦辉、何宗颖等同志的辛勤劳动成果,作者一并表示谢意。

在本书的排版、打印、绘图过程中,刘朋科、洪丽娜、张鹏飞、吴韧、焦明纲做了很多工作并给予了很大的帮助,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

编著者

二〇一〇年一月十日

目 录

第 1 章 强冲击试验概述	1
1.1 强冲击研究对武器装备和国防科技发展的作用和意义	1
1.2 强冲击问题研究方法	2
1.2.1 理论研究	3
1.2.2 试验与测试技术研究	6
1.2.3 理论与试验相结合的研究方法	10
1.3 强冲击试验的内涵	11
1.3.1 工程强冲击问题的特殊性和关键技术	11
1.3.2 强冲击研究的重要性	14
1.3.3 强冲击研究的内涵及其展望	16
第 2 章 强冲击试验相关理论	23
2.1 固体中弹性应力波的传播	23
2.1.1 材料对冲击加载的响应	23
2.1.2 弹性波传播	25
2.2 固体中非线性弹塑性应力波	29
2.2.1 非线性弹性波	29
2.2.2 塑性加载波	33
2.2.3 卸载波	38
2.3 冲击波	40
2.3.1 固体中冲击波的形成	40
2.3.2 冲击波的反射与透射	44
2.4 应力强度因子	46
2.4.1 常见裂纹的应力强度因子	48
2.4.2 叠加原理及其应用	52
第 3 章 材料和构件对强冲击载荷的响应	55
3.1 材料的应变率响应	55

3.2	材料的损伤	60
3.3	材料的动态断裂	65
3.3.1	脆性断裂	66
3.3.2	韧性断裂	67
3.3.3	疲劳断裂	70
3.4	侵彻与贯穿	75
第4章	强冲击基本参数的采集与处理方法	81
4.1	描述强冲击特性的基本参数	81
4.2	高 g 值加速度传感器及存储测试装置	87
4.2.1	高 g 值加速度传感器概述	87
4.2.2	压电薄膜高 g 值加速度传感器	91
4.2.3	压电石英晶体高 g 值加速度传感器	100
4.2.4	MEMS 压阻式高 g 值加速度传感器	118
4.2.5	MRMS 栅型电容式高 g 值加速度传感器	142
4.2.6	抗高过载存储测试装置	152
4.3	强冲击测试中的特殊问题	165
4.4	强冲击信号的数据处理方法	169
第5章	材料动态性能试验与测试	176
5.1	膨胀环试验与测试	176
5.2	霍布金生压杆试验与测试	181
5.3	裂纹损伤梁试验与测试	186
5.4	材料断裂韧性试验与测试	195
5.5	火炮身管疲劳裂纹扩展速率试验与测试	207
第6章	强冲击试验装置	213
6.1	空气炮强冲击试验系统	213
6.1.1	空气炮的系统组成及工作原理	213
6.1.2	参数计算	216
6.1.3	参数测试	220
6.1.4	试验步骤	222
6.2	跌落台强冲击试验系统	223
6.2.1	系统组成及工作原理	223
6.2.2	参数估算	225

6.2.3	试验步骤	228
6.3	炮击法强冲击试验系统	229
6.3.1	加载原理	229
6.3.2	试验弹设计	232
6.3.3	强冲击试验系统组成	243
6.3.4	试验方法与步骤	244
6.4	强冲击试验技术展望	247
第7章	强冲击试验的工程应用	252
7.1	航空机载数据记录仪强冲击试验	252
7.1.1	系统概述	252
7.1.2	参数估算	253
7.1.3	试验程序	254
7.1.4	试验实例	255
7.2	硬目标侵彻与贯穿强冲击试验	257
7.2.1	硬目标侵彻研究现状及需求背景	257
7.2.2	硬目标侵彻仿真分析	259
7.2.3	硬目标侵彻特性分析与材料特性	268
7.2.4	硬目标侵彻与贯穿强冲击试验的应用	271
第8章	高冲击加速度传感器校准	281
8.1	速度改变法校准原理	281
8.2	校准系统构成	282
8.3	高冲击校准的激励技术	282
8.3.1	高冲击校准激励要求	282
8.3.2	总体设计与装置构成	283
8.3.3	解决关键技术问题的技术途径	283
8.4	测速系统	286
8.4.1	测速系统的结构原理	286
8.4.2	测速系统的特点	286
8.5	数据处理软件	287
8.6	校准装置的不确定度评定	288
参考文献		291

第1章 强冲击试验概述

1.1 强冲击研究对武器装备和国防科技发展的作用和意义

强冲击是一种常见的军事现象、自然现象,也可以引申到社会现象。火炮发射弹丸,火药瞬间爆炸,输出高功率,对弹丸是一种强冲击;弹丸高速运动,摧毁目标,对目标是一种强冲击;导弹、巡航导弹这种硬目标侵彻武器,在弹体穿过、侵入不同目标时产生强冲击;穿甲弹、半穿甲弹、侵彻弹对钢甲、土层、混凝土及复合材料目标侵彻过程是一种强冲击;飞机坠毁时,机体高速撞击地面,飞机上配置的数据记录仪承受着强冲击环境;交通事故中的汽车相撞、火车相撞都是强冲击现象;地震更是典型的自然界强冲击现象。其实,自然科学和社会科学在很多方面都是相通的,社会的发展变化也伴随着“强冲击”。强冲击是客观存在的,而且往往伴随着极端条件和极端状态,社会科学中的“强冲击”是精神范畴的,两者之间有时还会互相转换。和一切客观存在的事物一样,强冲击也有两面性,负面和正面,不利面和有利面,破坏面和建设面。因此,要研究强冲击,用以减小负面、不利面和破坏面的损失,而增加正面、有利面和建设面的赢利。

强冲击研究对武器装备和国防科技的发展有着十分重要的意义:

(1) 从常规武器发展起来的制导武器有导弹、制导炮弹、制导炸弹、制导地雷,这四种制导武器中有一种或几种是用于攻击主战坦克、装甲战车、坚固火力点等地面近距离点目标。这几类武器的特点有:不直接命中不能摧毁目标,要求命中精度高,然而,命中了必须有能力摧毁目标,否则也达不到目的;要攻击的地面目标种类多,物理特性各异,对反坦克导弹战斗部的侵彻和穿过能力提出了严峻的挑战。为此,新发展的反坦克导弹必须探索新的技术途径,如:改善导弹战斗部材料的力学性能,发展超高速动能导弹,改进破甲战斗部结构,以导弹命中目标时硬质弹头的动能击穿并毁伤装甲目标。防御大规模集群坦克的快速进攻,是当前及未来局部或大规模地面战争的重要任务。世界各国反坦克武器体系中,反坦克导弹是最重要的一种,它是攻击坦克等装甲目标、坚固工事及其他近距离地面小型目标的有效武器。导弹战斗部对目标的击穿和毁伤都是典型的强冲击问题。

(2) 硬目标侵彻武器的强冲击装置、试验方法、测试和校准系统的研究关系到硬目标侵彻新型武器的研制、新型武器性能指标的实现。在硬目标侵彻武器的研制中,对不同硬目标的穿过和侵入特性是不同的,需要进行弹着目标过程的受力特性研究。尤其是目前急需的导弹、巡航导弹都是对付硬目标的侵彻弹。不掌握目标侵彻过程的力学特性,新弹种的力学性能、智能炸点控制系统就无从设计。

(3) 在硬目标侵彻武器的研制、定型、交验及生产中,不可能实际地对真实目标,如多层建筑物、大型舰船的多层装甲、主战坦克、坚固防御工事、碉堡及武装直升机等进行工况情况下的侵彻,来检验武器是否能在预定层数或预定位置起爆控制,这样的武器测试花费不起,也不现实,因此,要研究相应的等效试验、测试方法和测试系统,来检测武器系统的质量和效能,检查炸点控制系统是否能符合战术技术要求,其新型炸药是否能满足装药结构抗高过载和安全性、可靠性的要求。因此,随着打击硬目标作战需要的增加,国内外硬目标侵彻武器发展非常迅速,已成为新型武器研究的热点。因此,对弹药侵彻目标特性的试验、测试技术和方法的研究成为强冲击试验和测试领域的一项重要科研工作,对武器装备和国防科技发展有着重要的促进作用。

(4) 强冲击与爆炸、高速、瞬变、巨能瞬间释放往往联系在一起,这些大都呈现出极端条件下的物理现象。在极端条件下研究物态的性质及其变化规律是 21 世纪物理学研究的前沿领域之一。极端条件下的物质的性态与常规条件下物质的性态相比是极不相同的,可能会出现新的异于常态的性质。通过对这种异常性质的研究,能进一步剖析物质的微观本质,寻求新武器原理。动态高压加载技术及其装置的研究对提升强冲击试验水平至关重要,谁能冲击极限,谁能实现极限,谁就会占据制高点,谁就会更主动。因此,多种类型的动态高压加载技术的研究已成为当前的热点。

高性能新型武器装备的研究,国防科技的发展离不开对强冲击问题的研究,而强冲击理论及试验技术的深入研究必将有力地促进武器装备和国防科技的发展。

1.2 强冲击问题研究方法

强冲击是一种实际存在的力学现象,随着军事科学的高速发展,对强冲击问题的研究越显重要,然而遗憾的是这方面的研究工作远远不够,强冲击至今还是一种模糊的概念,没有明确的术语概念表述。在 GB/T 2298—91 中对机械冲击(简称冲击)是这样叙述的:能激起系统瞬态扰动的力、位置、速度或加速度的突然变化。并说明:突然变化系指变化时间小于系统的基本周期。那么强冲击只是一种程度的划分,而目前这种划分还没有。但在 GJB 150.18—86 军用设备环境试验方法冲