

高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用

含能破片战斗部 理论与应用

The Theory and Application of the Warhead
with Energetic Fragments

何勇 何源 王传婷 郭磊 编著



中国工信出版集团



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

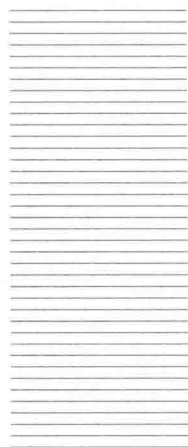


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目

高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用



含能破片战斗部 理论与应用

The Theory and Application of the Warhead
with Energetic Fragments

何勇 何源 王传婷 郭磊 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

破片式杀爆战斗部是我国弹药应用最广泛的战斗部类型,在我国各类炮弹、导弹、火箭弹平台均有大量应用。含能破片战斗部又称活性破片战斗部,是一种将多功能含能结构材料与预制破片式战斗部相结合的新概念高效毁伤战斗部技术。当含能破片高速撞击目标时,自身能产生燃烧/爆炸类化学反应,释放出不低于高能炸药量级的热量,并在穿透目标壳体后引燃/引爆易燃易爆类目标,有效提高了破片毁伤效能及杀伤后效,增加对目标的杀伤威力。

本书结合作者自身研究,从杀爆战斗部分类及特点、多功能含能结构材料制备及性能、杀爆战斗部基本原理及威力计算、含能破片对典型目标作用、杀爆战斗部毁伤效应等方面进行了介绍。本书既可作为从事弹药生产和研究的科技人员参考用书,也可作为弹药专业研究生教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

含能破片战斗部理论与应用 / 何勇等编著. -- 北京:
北京理工大学出版社, 2021. 6

(高效毁伤系统丛书. 智能弹药理论与应用)

ISBN 978 - 7 - 5682 - 9952 - 7

I. ①含… II. ①何… III. ①弹药 - 战斗部 - 研究
IV. ①TJ410.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 125602 号

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京捷迅佳彩印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 18.75

字 数 / 322 千字

版 次 / 2021 年 6 月第 1 版 2021 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 89.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- | | |
|-----|-----------------|
| 于全 | 中国工程院院士 |
| 王越 | 中国科学院院士、中国工程院院士 |
| 王小谟 | 中国工程院院士 |
| 王少萍 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 王建民 | 清华大学软件学院院长 |
| 王哲荣 | 中国工程院院士 |
| 尤肖虎 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 邓玉林 | 国际宇航科学院院士 |
| 邓宗全 | 中国工程院院士 |
| 甘晓华 | 中国工程院院士 |
| 叶培建 | 人民科学家、中国科学院院士 |
| 朱英富 | 中国工程院院士 |
| 朵英贤 | 中国工程院院士 |
| 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 刘大响 | 中国工程院院士 |
| 刘辛军 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 刘怡昕 | 中国工程院院士 |
| 刘韵洁 | 中国工程院院士 |
| 孙逢春 | 中国工程院院士 |
| 苏东林 | 中国工程院院士 |
| 苏彦庆 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 苏哲子 | 中国工程院院士 |
| 李寿平 | 国际宇航科学院院士 |



- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李春明 中国兵器工业集团首席专家
- 李莹辉 国际宇航科学院院士
- 李得天 国际宇航科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨绍卿 中国工程院院士
- 杨德森 中国工程院院士
- 吴伟仁 中国工程院院士
- 宋爱国 国家杰出青年科学基金获得者
- 张彦 电气电子工程师学会会士、英国工程技术
学会会士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆军 中国工程院院士
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
原机械工业部副部长
- 陈谋 国家杰出青年科学基金获得者
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士



- 郑纬民 中国工程院院士
- 郑建华 中国科学院院士
- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 中国工程院院士
- 赵沁平 中国工程院院士
- 郝 跃 中国科学院院士
- 柳百成 中国工程院院士
- 段海滨 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 侯增广 国家杰出青年科学基金获得者
- 闻雪友 中国工程院院士
- 姜会林 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 康 锐 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 谭春林 航天系统开发总师

《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》

编写委员会

名誉主编：杨绍卿 朵英贤

主 编：张 合 何 勇 徐豫新 高 敏

编 委：（按姓氏笔画排序）

丁立波 马 虎 王传婷 王晓鸣 方 中

方 丹 任 杰 许进升 李长生 李文彬

李伟兵 李超旺 李豪杰 何 源 陈 雄

欧 渊 周晓东 郑 宇 赵晓旭 赵鹏铎

查冰婷 姚文进 夏 静 钱建平 郭 磊

焦俊杰 蔡文祥 潘绪超 薛海峰



丛书序

智能弹药被称为“有大脑的武器”，其以弹体为运载平台，采用精确制导系统精准毁伤目标，在武器装备进入信息发展时代的过程中发挥着最隐秘、最重要的作用，具有模块结构、远程作战、智能控制、精确打击、高效毁伤等突出特点，是武器装备现代化的直接体现。

智能弹药中的探测与目标方位识别、武器系统信息交联、多功能含能材料等内容作为武器终端毁伤的共性核心技术，起着引领尖端武器研发、推动装备升级换代的关键作用。近年来，我国逐步加快传统弹药向智能化、信息化、精确制导、高能毁伤等低成本智能化弹药领域的转型升级，从事武器装备和弹药战斗部研发的高等院校、科研院所迫切需要一系列兼具科学性、先进性，全面阐述智能弹药领域核心技术和最新前沿动态的学术著作。基于智能弹药技术前沿理论总结和发展、国防科研队伍与高层次高素质人才培养、高质量图书引领出版等方面的需求，《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》应运而生。

北京理工大学出版社联合北京理工大学、南京理工大学和陆军工程大学等单位一线的科研和工程领域专家及其团队，依托爆炸科学与技术国家重点实验室、智能弹药国防重点学科实验室、机电动态控制国家级重点实验室、近程高速目标探测技术国防重点实验室以及高维信息智能感知与系统教育部重点实验室等多家单位，策划出版了本套反映我国智能弹药技术综合发展水平的高端学术著作。本套丛书以智能弹药的探测、毁伤、效能评估为主线，涵盖智能弹药目标近程智能探测技术、智能毁伤战斗部技术和智能弹药试验与效能评估等内容，凝聚了我国在这一前沿国防科技领域取得的原创性、引领性和颠覆性研究



成果，这些成果拥有高度自主知识产权，具有国际领先水平，充分践行了国家创新驱动发展战略。

经出版社与我国智能弹药研究领域领军科学家、教授学者们的多次研讨，《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》最终确定为12册，具体分册名称如下：《智能弹药系统工程与相关技术》《灵巧引信设计基础理论与应用》《引信与武器系统信息交联理论与技术》《现代引信系统分析理论与方法》《现代引信地磁探测理论与应用》《新型破甲战斗部技术》《含能破片战斗部理论与应用》《智能弹药动力装置设计》《智能弹药动力装置实验系统设计与测试技术》《常规弹药智能化改造》《破片毁伤效应与防护技术》《毁伤效能精确评估技术》。

《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》的内容依托多个国家重大专项，汇聚我国在弹药工程领域取得的卓越成果，入选“国家出版基金”项目、“‘十三五’国家重点出版物出版规划”项目和工业和信息化部“国之重器出版工程”项目。这套丛书承载着众多兵器科学技术工作者孜孜探索的累累硕果，相信本套丛书的出版，必定可以帮助读者更加系统、全面地了解我国智能弹药的发展现状和研究前沿，为推动我国国防和军队现代化、武器装备现代化做出贡献。

《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》
编写委员会



前 言

破片式杀爆战斗部是我国弹药应用最广泛的战斗部类型，在我国各类炮弹、导弹、火箭弹平台均有大量应用。含能破片战斗部又称为活性破片战斗部，是一种将多功能含能结构材料与预制破片式战斗部相结合的新概念高效毁伤战斗部技术。当含能破片高速撞击目标时，自身能产生燃烧/爆炸类化学反应，释放出不低于高能炸药量级的热量，并在穿透目标壳体后引燃/引爆易燃易爆类目标，有效提高了破片毁伤效能及杀伤后效，增加了对目标的杀伤威力。

作者结合自身研究，从杀爆战斗部分类及特点、多功能含能结构材料制备及性能、杀爆战斗部基本原理及威力计算、含能破片对典型目标作用、杀爆战斗部毁伤效应等方面进行了介绍。本书可作为从事弹药生产和研究的科技人员参考用书，亦可作为弹药专业研究生教材。

本书采用国际单位制，由南京理工大学何勇教授主持撰写，何源、王传婷、潘绪超、焦俊杰、郭磊、方中等参与撰写。

由于编写时间仓促，书中不妥之处希望读者批评指正。

作 者



目 录

第 1 章 含能破片战斗部概述	001
1.1 含能破片战斗部的概念	002
1.2 破片式战斗部研究现状及发展趋势	004
1.2.1 自然破片式战斗部	004
1.2.2 预控破片战斗部	006
1.2.3 预制破片战斗部	007
1.2.4 定向战斗部	008
1.3 多功能含能结构材料研究现状及发展趋势	013
1.3.1 理论进展	013
1.3.2 试验进展	014
1.3.3 数值进展	017
参考文献	018
第 2 章 多功能含能结构材料	023
2.1 多功能含能结构材料定义	024
2.2 多功能含能结构材料分类及特点	025
2.3 多功能含能结构材料的制备	026
2.3.1 聚合物基多功能含能结构材料的成型工艺	026
2.3.2 合金类多功能含能结构材料的制备	030



2.3.3	其他常用的多功能含能结构材料制备方法	032
2.4	多功能含能结构材料组织表征	037
2.4.1	XRD 表征	037
2.4.2	SEM 表征	038
2.4.3	TEM 表征	039
2.4.4	EBSD 表征	039
2.4.5	其他表征方法	040
2.5	多功能含能结构材料力学特性及测试	041
2.5.1	维氏硬度试验	041
2.5.2	多功能含能结构材料准静态压缩试验	042
2.5.3	材料动态力学性能研究方法	044
2.6	多功能含能结构材料反应特性及测试	049
2.6.1	准密闭容器试验	049
2.6.2	典型准密闭容器试验结果及数据处理	053
2.6.3	其他试验方法	057
	参考文献	057
第3章	破片式战斗部结构与原理	063
3.1	破片式战斗部结构类型	064
3.1.1	自然破片战斗部	065
3.1.2	预控破片战斗部	068
3.1.3	预制破片战斗部	072
3.1.4	几种传统破片战斗部的性能比较	075
3.2	破片式战斗部的基本原理与威力参数	076
3.2.1	破片战斗部的基本原理	076
3.2.2	破片飞散特性	077
3.2.3	破片杀伤特性	098
3.2.4	破片式战斗部爆炸效应	099
3.3	定向战斗部结构原理	107
3.3.1	定向战斗部特点及其意义	107
3.3.2	定向战斗部的结构分类	108
3.3.3	定向战斗部的技术问题	115
3.3.4	定向战斗部的能量增益	123
	参考文献	128



第 4 章 含能破片战斗部数值仿真技术	131
4.1 数值仿真软件简介	132
4.1.1 有限元方法	132
4.1.2 LS-DYNA 软件介绍	134
4.1.3 AUTODYN 软件介绍	136
4.2 多功能含能结构材料细观模型特性仿真	139
4.2.1 冲击压缩细观模拟有限元模型	139
4.2.2 冲击 Hugoniot 计算结果	142
4.3 包覆式含能破片爆炸驱动完整性仿真分析	146
4.3.1 包覆式含能破片爆炸驱动数值模型	146
4.3.2 仿真结果分析	151
4.4 多功能含能结构材料侵爆行为仿真研究	169
4.4.1 侵爆行为描述	169
4.4.2 数值模拟	170
4.4.3 含能破片侵彻过程	171
4.4.4 不同倾角对侵爆的影响	174
4.4.5 含能破片极限侵爆速度	177
4.5 活性破片对多层靶冲击起爆数值模拟	179
4.5.1 有限元模型	179
4.5.2 本构模型参数	180
4.5.3 状态方程参数	181
4.5.4 数值模拟结果	182
参考文献	183
第 5 章 含能破片对典型目标的毁伤效应	187
5.1 含能破片对金属结构靶的毁伤	189
5.1.1 碰撞过程力学分析	189
5.1.2 毁伤行为及机理	198
5.2 含能破片对燃油靶的毁伤	201
5.2.1 碰撞油箱引燃机理	204
5.2.2 侵彻油箱力学分析模型	206
5.2.3 数值模拟	207

5.3	含能破片对屏蔽装药的毁伤	209
5.3.1	冲击过程中屏蔽炸药内初始参量的计算	209
5.3.2	含能破片冲击引爆屏蔽炸药过程数值模拟研究	213
5.3.3	含能破片冲击引爆屏蔽炸药试验研究	218
5.3.4	含能破片对屏蔽炸药的毁伤机理	219
	参考文献	222
第6章	含能破片战斗部毁伤效应及试验技术	227
6.1	破片战斗部杀伤标准与杀伤面积	228
6.1.1	毁伤准则	228
6.1.2	人员的杀伤准则	230
6.1.3	杀伤面积	231
6.2	破片战斗部试验方法	239
6.2.1	传统接触式测试方法	239
6.2.2	高速成像法	241
6.2.3	光幕测试法	247
6.2.4	各破片参数测试方法对比分析	248
6.3	破片空间分布试验方法	249
6.3.1	球形靶试验方法	250
6.3.2	扇形靶试验方法	251
6.4	典型杀爆战斗部试验	253
6.4.1	球形靶威力试验	253
6.4.2	扇形靶静爆试验	258
6.4.3	矩形靶综合性能试验	263
	参考文献	274
	索引	275



| 1.1 含能破片战斗部的概念 |

破片式战斗部是战斗部的主要类型之一，主要是在高能炸药爆炸作用下，形成大量高速破片，利用破片的高速碰击、引燃和引爆作用毁伤目标。可以用于杀伤有生力量（人、畜）、无装甲或轻型装甲车辆、飞机、雷达及导弹等武器装备。

现阶段对武器装备的要求一是要能精确命中目标，二是要能高效毁伤目标，才能发挥更有效的精确打击效能，否则，击而不毁，事倍功半。常规破片式战斗部主要依赖惰性金属材料（如钨、钢、铜等）毁伤元打击目标，通过动能侵彻和机械贯穿作用对目标实施毁伤/杀伤。由于受惰性金属毁伤元单一动能毁伤机理和毁伤模式的局限，很大程度上制约了常规破片式战斗部毁伤威力的发挥和提升。因此，研究高效毁伤新材料、新机理和新方法，实现破片式战斗部威力大幅度提升，是世界各国弹药装备研发的共同目标。

含能破片战斗部又称活性破片战斗部，是一种将多功能含能结构材料与预制破片式战斗部相结合的新概念高效毁伤战斗部技术，其最早是 1976 年 Hugh 在专利中提出的。当其高速撞击目标时，自身能产生燃烧/爆炸类化学反应，释放出不低于高能炸药量级的热量，产生 3 000 ℃ 以上的高温，并在穿透目标壳体后引燃/引爆易燃易爆类目标，有效提高了破片毁伤效能及杀伤后效，增加对目标的杀伤威力。含能破片主要是由一种或者几种亚稳态复合材料组成的