

☆☆☆

# 导弹毁伤效能 试验与评估

---

DAODAN HUI SHANG XIAO NENG  
SHI YAN YU PING GU

————— 周旭 著 —————

☆☆☆



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 导弹毁伤效能 试验与评估

周旭著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书全面阐述了导弹毁伤效能试验与评估所涉及的多领域基础理论和工程技术,主要包括常见战斗部毁伤机理与毁伤效应、目标特性分析方法与目标毁伤准则、靶场试验方法与方案设计、靶标与效应场设计、试验数据测量与处理、毁伤效应数值模拟与工程算法、毁伤效能评估方法与评估系统等内容。

本书可供武器研制、试验、使用单位工程技术人员使用,也可供高等学校和相关科研院所教师、学生和研究人員参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

导弹毁伤效能试验与评估 / 周旭著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 12  
ISBN 978 - 7 - 118 - 09550 - 0

I. ①导... II. ①周... III. ①导弹 - 损伤 - 评估  
IV. ①TJ760. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 152059 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 787 × 1092 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$  字数 686 千字

2014 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 148.00 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

# 前 言

导弹毁伤效能试验与评估是导弹武器试验鉴定的重要内容和作战运用的重要基础。本书围绕导弹毁伤效能试验与评估中的主要技术问题,比较全面、系统地介绍相关领域的基础理论和工程技术。

导弹毁伤效能试验与评估涉及面比较广,从技术体系层面来讲,主要包括目标特性、试验方法、靶场设计、效应测量、计算机仿真、毁伤效能评估等方面的内容。目标特性研究的主要目的是准确掌握典型目标的抗毁伤能力和损伤机理,从而为靶标设计、计算机仿真试验以及毁伤效能评估提供必要的基础。常用的靶场试验方法主要有飞行试验、地面试验以及等效试验等类型。不同试验方法的适应性和实施方案有比较大的差异,本书进行了详细阐述。靶场设计的主要内容包括靶标设计、效应场设计以及合作目标设计,其中的主要问题是等效性、代表性以及经济性问题。导弹毁伤效应测量中的关键问题是落点捕捉、传感器布局优化以及同步触发,直接关系到测量效率和精度。毁伤效应计算机仿真试验是弥补小子样靶场试验不足的有效手段,因此在导弹毁伤效能试验与评估中具有重要价值和意义,本书对毁伤效应仿真技术基础进行了比较全面的综述。本书在毁伤效能评估方面,重点介绍了近年来发展起来的毁伤指数评估法,包括其基础理论、评估模型、评估流程,并结合实例进行了详细讲解;利用毁伤指数评估法,可以实现导弹武器打击大型复杂目标毁伤效能的定量化评估。此外,为了提供必要的知识基础,本书在参考了大量文献的基础上,对各类毁伤效应及其基本规律进行了较全面的总结,但基本不涉及具体计算方法,读者如果需要,可以参考相关文献。

本书汇总了作者多年从事相关工作的知识和研究成果,同时也参考引用了国内外大量的技术文献,并分别罗列于各章的参考文献部分。由于参考文献量比较大,并且有些引用内容难以核实最早出处,因此难免有遗漏或注解不详,敬请相关学者和学术组织谅解,作者在此表示诚挚的感谢。

参与本书编写、审核、校对的有陈国宏、陈钰、谷建光、黄咏政、刘利宏、邵长林、施鹏、谭锋、姚惠生、张凤林、张光莹、赵玉立。杨秀敏院士和崔俊芝院士对作者的研究工作和本书编写给予了大量的、悉心的指导和帮助,谨向两位导师表示由衷的感谢和崇高的敬意。本书得到了作者单位和上级机关的大力帮助和支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,疏漏、不妥、错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2014年10月于北京

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 导弹毁伤效能试验的主要目的 .....           | 1  |
| 1.2 导弹毁伤效能试验中的主要问题 .....          | 1  |
| 1.3 国外导弹毁伤效能试验概况 .....            | 3  |
| 第2章 毁伤效应及其基本规律 .....              | 6  |
| 2.1 空气中爆炸现象与规律 .....              | 6  |
| 2.1.1 爆炸定义 .....                  | 6  |
| 2.1.2 爆轰波特性 .....                 | 6  |
| 2.1.3 影响装药爆轰的多种因素 .....           | 6  |
| 2.1.4 爆炸冲击波特点 .....               | 8  |
| 2.1.5 空气冲击波参数 .....               | 9  |
| 2.1.6 空气冲击波在目标上的反射及绕流 .....       | 11 |
| 2.1.7 冲击波在介质自由表面上的反射及对介质的毁伤 ..... | 15 |
| 2.2 水中爆炸现象与规律 .....               | 16 |
| 2.2.1 水中爆炸的基本现象 .....             | 16 |
| 2.2.2 水中爆炸的基本特点 .....             | 16 |
| 2.2.3 炸药水中爆炸冲击波参数 .....           | 18 |
| 2.2.4 水中爆炸对水中障碍物的作用 .....         | 19 |
| 2.3 岩土中爆炸现象与规律 .....              | 21 |
| 2.3.1 岩土中爆炸的基本现象 .....            | 21 |
| 2.3.2 岩土中的爆炸应力波 .....             | 22 |
| 2.3.3 爆破漏斗 .....                  | 25 |
| 2.4 建(构)筑物目标内外部爆炸现象及基本规律 .....    | 28 |
| 2.4.1 爆炸冲击波荷载 .....               | 28 |
| 2.4.2 爆炸破坏效应分类 .....              | 32 |
| 2.4.3 建(构)筑物构件在爆炸荷载作用下的响应 .....   | 33 |
| 2.4.4 建(构)筑物在外爆荷载作用下的响应 .....     | 41 |
| 2.4.5 建(构)筑物在内爆荷载作用下的响应 .....     | 44 |
| 2.5 破片生成与毁伤基本规律 .....             | 46 |
| 2.5.1 破片生成特点 .....                | 46 |
| 2.5.2 破片空间分布 .....                | 47 |
| 2.5.3 破片数及破片质量 .....              | 48 |

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 2.5.4 | 破片初速            | 48  |
| 2.5.5 | 破片毁伤效应          | 50  |
| 2.6   | 侵彻毁伤现象及其基本规律    | 51  |
| 2.6.1 | 侵彻作用分类          | 51  |
| 2.6.2 | 靶目标侵彻毁伤基本形式及其特征 | 52  |
| 2.6.3 | 侵彻体破坏特征         | 56  |
| 2.6.4 | 长杆式动能弹侵彻效应      | 58  |
| 2.6.5 | 侵彻效应的影响因素       | 59  |
| 2.7   | 聚能效应及其基本规律      | 61  |
| 2.7.1 | 聚能装药分类          | 61  |
| 2.7.2 | 聚能侵彻体形成过程及特点    | 62  |
| 2.7.3 | 聚能侵彻体侵彻过程及特点    | 63  |
|       | 参考文献            | 65  |
| 第3章   | 毁伤试验方法          | 69  |
| 3.1   | 战斗部类型与机理        | 69  |
| 3.1.1 | 动能侵彻战斗部         | 69  |
| 3.1.2 | 聚能破甲战斗部         | 71  |
| 3.1.3 | 导电纤维战斗部         | 73  |
| 3.1.4 | 爆破战斗部           | 75  |
| 3.1.5 | 破片杀伤战斗部         | 76  |
| 3.1.6 | 穿爆燃战斗部          | 78  |
| 3.1.7 | 子母战斗部           | 79  |
| 3.1.8 | 其他新型战斗部         | 82  |
| 3.1.9 | 战斗部发展趋势         | 83  |
| 3.2   | 试验方法分析          | 84  |
| 3.2.1 | 地面试验            | 85  |
| 3.2.2 | 毁伤效应飞行试验        | 91  |
| 3.2.3 | 等效毁伤试验方法        | 93  |
| 3.2.4 | 仿真试验方法          | 95  |
| 3.3   | 毁伤试验方法确定        | 96  |
| 3.3.1 | 基本原则            | 96  |
| 3.3.2 | 一般步骤            | 97  |
| 3.3.3 | 整体侵彻爆破战斗部毁伤试验方法 | 97  |
| 3.3.4 | 整体杀伤爆破战斗部毁伤试验方法 | 100 |
| 3.3.5 | 整体串联爆破战斗部毁伤试验方法 | 102 |
| 3.3.6 | 子母侵彻爆破战斗部毁伤试验方法 | 104 |
| 3.3.7 | 子母杀伤爆破战斗部毁伤试验方法 | 106 |
| 3.3.8 | 子母导电纤维战斗部毁伤试验方法 | 107 |
| 3.4   | 小结              | 108 |

|                      |            |
|----------------------|------------|
| 参考文献                 | 110        |
| <b>第4章 目标特性与毁伤准则</b> | <b>111</b> |
| 4.1 目标分类及特征          | 111        |
| 4.1.1 目标分类及选择        | 111        |
| 4.1.2 典型目标分析         | 112        |
| 4.2 建筑物结构特性分析方法      | 132        |
| 4.2.1 收集宏观背景信息       | 133        |
| 4.2.2 提取基本特征数据       | 135        |
| 4.2.3 结构体系评定         | 136        |
| 4.2.4 模拟推演           | 139        |
| 4.2.5 等效类比           | 145        |
| 4.3 建筑物结构损伤机理        | 149        |
| 4.3.1 砌体结构           | 149        |
| 4.3.2 框架结构           | 152        |
| 4.3.3 剪力墙结构          | 158        |
| 4.3.4 排架结构           | 159        |
| 4.4 建筑物构件贡献因子计算方法    | 161        |
| 4.4.1 等位移内力比值法       | 161        |
| 4.4.2 结构广义刚度比值法      | 164        |
| 4.5 建筑物目标毁伤准则        | 165        |
| 4.5.1 基于整体损伤模式的毁伤准则  | 165        |
| 4.5.2 基于局部损伤模式的毁伤准则  | 167        |
| 参考文献                 | 175        |
| <b>第5章 靶标与效应场设计</b>  | <b>176</b> |
| 5.1 相似理论基础           | 176        |
| 5.1.1 相似的基本概念        | 176        |
| 5.1.2 相似理论基本定理       | 178        |
| 5.1.3 相似准则的导出方法      | 182        |
| 5.1.4 物理相似系统建模及分析    | 183        |
| 5.1.5 侵爆效应相似律        | 185        |
| 5.2 地面试验靶标设计         | 194        |
| 5.2.1 设计准则           | 195        |
| 5.2.2 等效设计方法及流程      | 197        |
| 5.3 飞行试验靶标设计         | 200        |
| 5.3.1 设计准则           | 201        |
| 5.3.2 设计方法及流程        | 202        |
| 5.4 飞行试验效应场设计        | 208        |
| 5.4.1 设计准则           | 208        |
| 5.4.2 设计方法及流程        | 209        |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 5.4.3      | 空爆效应场设计 .....            | 213        |
| 5.4.4      | 触地爆效应场设计 .....           | 215        |
| 5.5        | 景象匹配区设计 .....            | 216        |
| 5.5.1      | 设计准则 .....               | 216        |
| 5.5.2      | 设计方法及流程 .....            | 217        |
| 5.5.3      | 红外/可见光光学景象匹配区设计 .....    | 218        |
|            | 参考文献 .....               | 222        |
| <b>第6章</b> | <b>毁伤效应测量与数据处理 .....</b> | <b>223</b> |
| 6.1        | 概述 .....                 | 223        |
| 6.1.1      | 测量方法及其分类 .....           | 223        |
| 6.1.2      | 测量系统的基本组成 .....          | 224        |
| 6.1.3      | 毁伤效应参数测量与处理技术的发展方向 ..... | 225        |
| 6.2        | 毁伤效应测量技术基础 .....         | 226        |
| 6.2.1      | 传感器技术 .....              | 226        |
| 6.2.2      | 数据采集技术 .....             | 228        |
| 6.2.3      | 同步触发技术 .....             | 231        |
| 6.3        | 误差分析与数据处理技术基础 .....      | 232        |
| 6.3.1      | 误差理论及基本性质 .....          | 232        |
| 6.3.2      | 测量数据处理 .....             | 234        |
| 6.4        | 冲击波超压测量 .....            | 245        |
| 6.4.1      | 测量方法 .....               | 245        |
| 6.4.2      | 测量系统 .....               | 246        |
| 6.4.3      | 误差分析 .....               | 249        |
| 6.5        | 破片测量 .....               | 250        |
| 6.5.1      | 地面静爆试验测量 .....           | 250        |
| 6.5.2      | 靶场飞行试验测量 .....           | 252        |
| 6.5.3      | 误差分析 .....               | 252        |
| 6.6        | 毁伤面积测量 .....             | 254        |
| 6.6.1      | 不同类型毁伤效果的毁伤面积 .....      | 254        |
| 6.6.2      | 机场跑道毁伤面积的测量 .....        | 254        |
| 6.6.3      | 杀爆子母弹毁伤面积的测量 .....       | 256        |
| 6.7        | 炸点深度测量 .....             | 257        |
| 6.7.1      | 基本概念 .....               | 257        |
| 6.7.2      | 测量方法 .....               | 257        |
| 6.8        | 着靶参数测量 .....             | 258        |
| 6.8.1      | 基本概念 .....               | 258        |
| 6.8.2      | 测量方法 .....               | 258        |
|            | 参考文献 .....               | 260        |
| <b>第7章</b> | <b>毁伤效应数值模拟 .....</b>    | <b>262</b> |



|                     |                 |            |
|---------------------|-----------------|------------|
| 7.1                 | 概述              | 262        |
| 7.2                 | 连续介质力学基本概念      | 262        |
| 7.2.1               | 运动描述方法          | 262        |
| 7.2.2               | 基本规律            | 264        |
| 7.3                 | 数值算法简介          | 265        |
| 7.3.1               | 有限元法            | 266        |
| 7.3.2               | 有限差分法           | 270        |
| 7.3.3               | 有限体积法           | 272        |
| 7.3.4               | 无网格方法概述         | 275        |
| 7.3.5               | 光滑粒子流体动力学法      | 276        |
| 7.3.6               | 物质点法            | 279        |
| 7.3.7               | 离散单元法           | 282        |
| 7.4                 | 材料本构方程及参数       | 284        |
| 7.4.1               | 流体本构方程及参数       | 285        |
| 7.4.2               | 金属本构方程及参数       | 287        |
| 7.4.3               | 混凝土类本构方程及参数     | 291        |
| 7.4.4               | 岩土材料本构方程及参数     | 304        |
| 7.4.5               | 各种材料本构方程适用性比较   | 308        |
| 7.5                 | 数值模拟建模技术        | 308        |
| 7.5.1               | 数值模拟建模基本概念      | 309        |
| 7.5.2               | 数值模拟建模准则        | 310        |
| 7.5.3               | 模型简化            | 311        |
| 7.5.4               | 数值算法选择          | 314        |
| 7.5.5               | 单元类型选择          | 315        |
| 7.5.6               | 网格划分            | 317        |
| 7.5.7               | 计算范围确定和计算边界条件处理 | 319        |
| 7.5.8               | 接触算法            | 319        |
| 7.5.9               | 钢筋混凝土建模         | 321        |
| 7.6                 | 毁伤效应数值模型验证与评定   | 324        |
| 7.6.1               | 验证与评定概念         | 324        |
| 7.6.2               | 验证与评定原则         | 324        |
| 7.6.3               | 数据一致性检验方法       | 326        |
| 7.6.4               | 验证与评定流程         | 327        |
|                     | 参考文献            | 337        |
| <b>第8章 毁伤效应工程算法</b> |                 | <b>340</b> |
| 8.1                 | 冲击效应工程算法        | 340        |
| 8.1.1               | 侵彻深度经验公式        | 341        |
| 8.1.2               | 贯穿厚度和震塌厚度经验公式   | 350        |
| 8.2                 | 破片毁伤效应工程算法      | 353        |

|        |                       |     |
|--------|-----------------------|-----|
| 8.2.1  | TM5-855-1 手册方法        | 353 |
| 8.2.2  | TM5-1300 手册方法         | 357 |
| 8.3    | 爆炸效应工程算法              | 362 |
| 8.3.1  | 爆炸冲击波比例定律             | 362 |
| 8.3.2  | 入射冲击波参数               | 363 |
| 8.3.3  | 反射冲击波参数               | 366 |
| 8.3.4  | 地冲击参数                 | 369 |
| 8.3.5  | 爆炸局部破坏参数              | 373 |
| 8.4    | 建筑物构件爆炸载荷工程算法         | 375 |
| 8.4.1  | 建筑物构件爆炸载荷概述           | 376 |
| 8.4.2  | 不考虑与结构相互作用的载荷工程算法     | 376 |
| 8.4.3  | 考虑与结构相互作用的载荷工程算法      | 383 |
| 8.5    | 建筑物构件动力响应工程算法         | 393 |
| 8.5.1  | 构件动力响应概述              | 393 |
| 8.5.2  | 构件剪切破坏研究简介            | 394 |
| 8.5.3  | 构件弯曲响应工程算法            | 395 |
|        | 参考文献                  | 405 |
| 第9章    | 毁伤效能综合评估              | 407 |
| 9.1    | 毁伤效能评估方法综述            | 407 |
| 9.1.1  | 毁伤概率评估方法              | 407 |
| 9.1.2  | 毁伤树评估方法               | 409 |
| 9.1.3  | 降阶态评估法                | 411 |
| 9.1.4  | 其他评估方法                | 412 |
| 9.1.5  | 小结                    | 414 |
| 9.2    | 毁伤指数评估法               | 415 |
| 9.2.1  | 毁伤指数评估法基本思想           | 415 |
| 9.2.2  | 毁伤指数评估通用模型            | 417 |
| 9.3    | 整体侵爆战斗部打击地面建筑物的毁伤指数评估 | 421 |
| 9.3.1  | 评估模型                  | 421 |
| 9.3.2  | 评估方法及流程               | 425 |
| 9.3.3  | 评估结果                  | 427 |
|        | 参考文献                  | 429 |
| 第10章   | 毁伤效能演示验证与评估系统         | 431 |
| 10.1   | 系统功能需求分析              | 431 |
| 10.2   | 系统总体设计                | 432 |
| 10.3   | 系统功能模块设计              | 437 |
| 10.3.1 | 三维建模                  | 437 |
| 10.3.2 | 易损性分析                 | 439 |
| 10.3.3 | 弹目交会过程演示              | 440 |

|     |                                     |     |
|-----|-------------------------------------|-----|
| 722 | 10.3.4 毁伤效果演示验证 .....               | 441 |
| 723 | 10.3.5 毁伤效能评估 .....                 | 443 |
| 724 | 10.3.6 数据库管理 .....                  | 444 |
| 725 | <b>10.4 关键技术实现</b> .....            | 446 |
| 726 | 10.4.1 基于数值仿真的毁伤效果重构技术 .....        | 446 |
| 727 | 10.4.2 基于工程算法的毁伤效果显示技术 .....        | 447 |
| 728 | 10.4.3 基于 GPU 建筑物实时爆炸扭曲特效模拟技术 ..... | 448 |
| 729 | <b>参考文献</b> .....                   | 449 |

# 第1章 绪论

## 1.1 导弹毁伤效能试验的主要目的

导弹武器靶场试验主要包括系统可靠性、运载能力、打击精度、突防能力以及毁伤效能等试验内容。现代化战争的特点是强烈对抗、精确打击、高效毁伤,从实战要求来讲,导弹武器的毁伤能力与运载能力、制导能力、突防能力等战技性能指标同等重要。

导弹武器毁伤效能试验要达到两个主要目的:一是要准确客观地考核战斗部在实战状态下的毁伤威力等战技性能指标,例如,战斗部以作战形式打击目标的爆炸冲击波威力、破片毁伤参数、侵彻与穿甲能力等;二是要获得能够应用于指导实战的战斗部对目标的毁伤效能综合评估结论。毁伤效能是指战斗部打击目标的毁伤能力与效果,毁伤威力等战技性能指标不等于毁伤能力,也无法仅仅凭借武器的战技性能指标去简单地评估它对目标的毁伤效果。因为在战场上武器所面对的是千变万化的具体的目标,不同条件下武器的毁伤威力是不一样的,同样的毁伤威力对不同目标的毁伤能力与毁伤效果也是不一样的,也就是说,孤立的战技性能指标参数即使是客观的、准确的,也很难直接应用于指导武器的战场运用。因此,在战标考核的基础上实现导弹武器对目标的毁伤效能的综合评估是毁伤试验的重要目的之一,也是导弹武器毁伤试验的最终目的。

## 1.2 导弹毁伤效能试验中的主要问题

为了科学高效地开展毁伤试验,并且顺利实现毁伤试验的主要目标,需要解决四个方面的关键问题。

第一个关键问题是如何准确掌握目标特性。目标既是战场上武器打击的对象,也是毁伤试验中的靶标原型,如果不准确掌握目标特性就很难设计科学有效的靶标。目标特性的主要内容包括地理与环境特性、物理特性、几何特性、伪装特性、防护特性、功能特性以及结构特性等。其中,防护特性、功能特性以及结构特性决定着目标的抗毁伤能力。目标的抗毁伤能力与特性称为目标的易损性,直接关系到武器对目标的毁伤效果,因此,目标易损性是目标特性的重要组成部分。从导弹武器毁伤试验、战场火力计划以及战场毁伤效果评判的角度讲,目标易损性是目标特性研究的重点。目标易损性主要包括结构易损性与功能易损性这两方面内容,顾名思义,结构易损性与目标结构的抗毁伤能力相对应,功能易损性与目标功能的抗毁伤能力相对应。

这个问题的困难在于研究对象是敌对方的目标,能够掌握的往往仅是宏观的、外在的基本信息,这对毁伤试验来说是远远不够的,因此,需要发展目标特性推演分析技术和目标易损性量化分析与计算技术。目标特性推演分析是要在宏观情报信息的基础上,利用

推演或类比等方法获得所研究目标的细致特性和参数。目标易损性量化分析与计算是要定量地描述目标的抗毁伤能力与特性。毁伤试验的目的一是要定量地考核武器的战技性能指标,二是要定量地评估战斗部对目标的毁伤效能,自然地,目标的抗毁伤能力也应该进行定量的描述。不同类型的目标,其易损性有不同的侧重面。例如,对地面建筑物等设施类目标来说,结构易损性是重点,而对飞机船舶等装备类目标来说,功能易损性是重点。两种易损性的分析计算技术不同,但是分析计算方法是相通的,基本方法:在目标宏观特性分析的基础上,建立易损性量化指标体系,然后依据量化指标体系的内在关联性建立等效量化模型,最后利用量化模型完成指标体系的计算。

第二个关键问题是如何在确保试验结果客观性的同时有效地降低试验成本。毁伤试验的显著特点是需要根据战场打击目标在试验靶场建设毁伤效应靶标,而毁伤效应靶标的建设经费动辄几百万、几千万甚至数亿元,所以,毁伤试验的成本远远高于以可靠性、运载能力以及打击精度为主的导弹武器试验,因此,降低试验成本对毁伤试验来说至关重要。武器、靶标以及武器打击靶标的方式是导弹靶场毁伤试验的三要素,靶场试验中的武器是真实的,武器打击靶标的方式是贴近实战的,然而毁伤效应靶标则不可能完全采用真实的战场目标,也就是说,靶场试验中武器所打击的目标多数情况下不是真实的战场目标,而是模拟靶标或者替代靶标。那么,如何利用模拟靶标或者替代靶标去获得贴近实战的毁伤效果?也就是说,如何确保试验结果的客观性?这是毁伤试验是否能取得成功的基本前提。

确保试验结果的客观性的基本途径是保证毁伤效应靶标与真实目标的等效性,前面提到,靶标与真实目标不可能做到完全一致,但是我们可以做到的是让靶标与真实目标充分等效,只要保证了试验靶标与真实目标的等效性,那么试验结果的客观性是可以保证的。降低毁伤试验成本的基本途径是降低靶标的建设经费,因为毁伤效应靶标是毁伤试验成本的重要来源,那么怎样才能降低靶标的建设经费呢?办法是缩小靶标规模、简化靶标结构,甚至以不贴近实战的形式进行毁伤试验,因此不建靶标。事实上,降低试验成本与保证试验结果的客观性是互相矛盾的,从降低试验成本的角度讲,靶标越简单越好,而从保证试验结果的客观性角度来讲,靶标越接近真实目标越好,因此,试验方法与方案设计技术必须有效地化解这一对矛盾,实现以低成本获得贴近实战的试验结果。

第三个关键问题是如何获得全方位的、大量的毁伤效应数据。导弹武器毁伤试验成本高、周期长、实施难度大,因此不可能进行大量的靶场试验,也就是说,通过靶场试验只可能获得少量的毁伤效应数据,然而,准确、客观、全面的战技性能指标考核,尤其是毁伤效能综合评估,需要大量的毁伤效应数据,那么如此大量的毁伤效应数据从哪里来呢?这是导弹武器毁伤试验所面临的特殊问题。

解决这个问题的技术途径是毁伤效应计算机仿真试验技术,通过计算机仿真试验手段获得大量的毁伤效应数据。毁伤效应计算机仿真试验是指在计算机中建立战斗部模型与目标模型,利用数学力学方法与技术计算机中真实地模拟战斗部打击目标的全过程,从而获得毁伤效应数据,基本途径:首先要建立起功能强大的、实用的毁伤效应计算机仿真试验系统,然后以仿真系统为平台在计算机中建立毁伤试验模型,在仿真试验模型经过靶场试验验证之后就可以根据需要在计算机中进行大量的仿真试验,这样就可以获得大

量、有效的毁伤效应数据。计算机仿真试验是最经济、最有效的毁伤效应数据来源,对于导弹武器毁伤试验来说,甚至可以说是大量毁伤效应数据的唯一来源。

第四个关键问题是如何根据试验数据得到毁伤效能综合评估结论。毁伤效应数据是毁伤试验的直接结果,毁伤效能是通过毁伤试验需要得到的结论,从结果到结论,是一个从现象到本质、从特殊到一般的重要过程,这个过程是否能够实现直接关系到是否能够真正实现毁伤试验的最终目标。因此,如何根据试验数据得到毁伤效能综合评估结论是导弹武器毁伤试验的根本问题。

解决这个问题的技术途径是毁伤效能量化评估理论与技术,目的是要获得能够应用于指导实战的毁伤效能综合评估结论。什么样的结论才能够应用于指导实战呢?现代化战争是高技术条件下的信息化战争,信息化的基本要求是模型化、数字化、定量化,因此毁伤效能的量化评估是现代化战争精确打击与高效毁伤的基本要求。毁伤效能量化评估是要定量地描述战斗部在实战条件下对打击目标的毁伤能力与效果。只有掌握了科学的量化评估理论与先进的评估技术才可能从试验结果得到所需要的试验结论。

### 1.3 国外导弹毁伤效能试验概况

美国与苏联历来非常重视导弹武器高效毁伤技术研究,经过几十年的发展,形成了合理的试验模式、科学的试验方法与手段、完备的靶场试验条件、先进的试验理论与技术体系。

美国先后建立了多种试验鉴定模式,其中主要包括分别试验鉴定、联合试验鉴定、系统级功能试验鉴定以及一体化试验鉴定等四种模式。分别试验鉴定模式是指承包商、政府和作战试验鉴定部队,根据各自试验的目的和需要,分别制定试验和鉴定计划,分别进行试验。联合试验鉴定模式是指在研制期间,由承包商、政府和作战试验鉴定部队共同制定试验鉴定计划,联合起来进行试验。系统级功能试验鉴定模式是指试验直接从系统开始,这种试验模式一般是在紧急情况而且系统比较简单时才会使用。一体化试验鉴定模式是指由型号项目办公室统一制定试验鉴定计划并统一实施,把统一的试验鉴定计划贯穿于从研制试验到作战使用试验的全过程,尽可能地把研制试验、鉴定定型试验以及作战使用试验结合起来,做到试验资源与试验结果共享,并且让作战使用部队尽早参与试验。这样既可以极大地降低试验经费、缩短研制周期,也可以加快武器列装进度并且有利于提高作战使用部队的应急作战能力。因此,一体化试验鉴定模式是美军最常采用的试验模式。

美国导弹武器试验方法与手段主要有四种:地面试验、飞行试验、战场检验以及计算机仿真试验。地面试验是美国最常用的靶场试验方法,不仅仅应用于研制阶段毁伤技术研究,而且被大量应用于辅助性鉴定定型试验。火箭橇试验是美军最常用的地面试验方法,火箭橇试验是指一辆滑车搭载着试验战斗部在火箭发动机的驱动下沿滑轨由起点到终点不断加速滑行,最终以一定的速度与姿态打击设置于滑轨终点的靶标,从而考核战斗部的毁伤能力与其他性能指标。这种试验成本低、效果好。美国一共建有4条大型通用的和20多条专用的火箭橇轨道。火箭橇轨道的长度决定着火箭



橇的试验能力,美国的火箭橇轨道大都在6000m以上,最长的达到16km,可以达到5个马赫数以上的着靶速度,满足大多数战斗部的地面试验需求。飞行试验是一种将导弹武器系统以贴近实战方式进行的鉴定性试验,美军每一种常规导弹一般都要进行少量的实弹飞行试验。其毁伤试验中常用的靶标有两种类型:一种类型是模拟靶标,根据战场目标特性,利用等效设计技术进行模拟靶标的等效性设计,如反舰型战斧巡航导弹试验中的靶舰、对陆攻击巡航导弹试验中的机库掩体、白沙导弹靶场的模拟堡垒等;另一种类型靶标是真实靶标,多数是退役的各类武器装备,例如,退役的“美国”号航空母舰,于2006年4月经历了25天的狂轰滥炸之后,成为世界上葬身海底的最大军舰。另外,美军退役的31艘“斯普鲁恩斯”级导弹驱逐舰中,已有19艘被炸沉。战场检验是美军特有的最有效的导弹武器试验手段,以战场为试验场,充分利用真实的战场环境检验武器装备的作战效能,其效果是其他试验手段无以伦比的。例如,在海湾战争、科索沃战争以及伊拉克战争中,大量的毁伤子样不但全面检验了各兵种武器的作战效能,而且对美国武器装备的发展具有不可估量的作用。美军最值得引以为傲的武器试验方法是计算机仿真试验。计算机仿真试验已成为美国导弹武器试验与相关技术研究的重要手段,并且取得了巨大的军事与经济效益。早在20世纪50年代,通用动力公司就采用混合计算机系统实现了对“宙斯神”导弹的仿真设计与部分试验。从60年代开始,仿真试验技术在导弹与航天领域得到了大规模的应用,甚至多数研制试验项目都是由仿真试验来完成的。到了70年代,美军的计算机仿真试验已经实现了系统化,相继建立了著名的六大仿真系统,这些仿真系统在常规导弹武器试验与鉴定过程中发挥了重要作用。从90年代开始,美军提出了“虚拟飞行试验”(VFT)的概念,对各大靶场、各大系统进行综合连网,应用于模拟综合性飞行试验的全过程。

为了进行导弹武器试验,美国建设了一系列规模大、综合程度高、功能强的试验靶场,主要有白沙导弹靶场、太平洋导弹试验中心、西部航天和导弹中心、夸贾林导弹靶场、空军飞行试验中心、犹他试验训练靶场、海军武器中心、内利斯空军靶场等,这些靶场承担着各类导弹的研制、鉴定定型以及作战试验任务。其中毁伤试验备受重视,战场上的主要典型目标基本上都可以在靶场找到相应的靶标与效应物。例如,仅仅犹他试验训练靶场就建设有四个专用靶区,在各靶区内,建设有模拟实战场景、模拟工业区、储藏库、指挥所、机场、铁路等。

在靶场试验方法与方案设计技术方面,对战场典型目标,尤其是高价值目标,他们不仅仅是通过先进的情报手段掌握其各种宏观特性与地理位置,而且有一套完整的、标准化的易损性分析方法,并且建立了非常庞大的信息化目标特性数据库。这些数据库不但是现代化战争的直接需要,而且为武器毁伤试验方法设计奠定了基础。在此基础上利用相似性原理与等效理论完成的靶标设计既可以确保试验结果的准确性与客观性,同时也具有非常好的经济性。

在毁伤效应计算机仿真试验技术方面,上文提到其仿真试验技术已经达到了实用性非常强、可靠性非常高、应用面非常广的程度,其背后既有先进的软硬件技术支撑,更有非常坚实的理论与方法基础,还有从未间断过的对前沿与尖端理论技术的重视,例如,十几年前新兴的无网格数值计算理论与方法在学术界取得一系列初期突破性成果之后,美国军方敏锐地洞察到该方法与经典的计算力学方法相比在毁伤效应计算与

军事探测方面具有显著的优越性,迅速作出反应,重点扶持并且严加保护。作者了解到,经过近十年的发展,无网格数值计算理论与方法在军事上得到了高价值的应用,其发展速度是惊人的。

在毁伤效能量化评估理论与技术方面,经过几十年的发展,美国从武器系统的综合作战效能出发,在对战场目标进行科学分类、易损性研究、毁伤机理和终点毁伤效应研究的基础上,应用现代系统控制理论和数字虚拟现实技术,建立起了完整实用的量化综合评估系统,这些系统在其尖端武器装备发展过程中得到了广泛的应用,在近年的几次局部战争中发挥了重要作用。

### 1.1.2 计算机仿真技术在军事上的应用

#### 1.1.2.1 计算机仿真的概念

计算机仿真是指利用计算机对客观事物进行模拟,以解决实际工程问题的一种方法。计算机仿真的对象是客观事物,其特点是:①对客观事物进行抽象,建立数学模型;②对数学模型进行求解;③对求解结果进行解释。

#### 1.1.2.2 计算机仿真的分类

计算机仿真按其用途可分为:①工程仿真,即对工程问题进行仿真;②科学仿真,即对科学问题进行仿真;③军事仿真,即对军事问题进行仿真。按其实现方式可分为:①硬仿真,即利用物理设备进行仿真;②软仿真,即利用计算机进行仿真。



图 1.1.2 计算机仿真的结果

#### 1.1.2.3 计算机仿真的应用

计算机仿真的应用非常广泛,在军事上主要用于武器系统的性能评估、作战方案的研究、训练模拟等。



## 第2章 毁伤效应及其基本规律

毁伤效应是指弹药对目标的毁伤效果,毁伤效应学的研究对象主要包括爆轰理论、爆炸效应、破片效应、侵彻效应、聚能效应等。本章参考和引用了大量的著作、学位论文、技术报告以及学术论文等,对主要毁伤效应的基本现象及基本规律进行了较为全面的总结。

### 2.1 空气中爆炸现象及其基本规律

#### 2.1.1 爆炸定义

爆炸是一种极为快速的物理或化学的能量释放过程。爆炸过程可分为两个阶段:①物质的潜在能量转化为强烈的压缩能;②压缩能急剧地向外膨胀,在膨胀过程中对外做功,造成被冲击物的变形、移动和破坏。就爆炸产生过程而言,爆炸大致可分为化学爆炸、物理爆炸以及核爆炸等。

#### 2.1.2 爆轰波特性

爆轰波是一种伴随有化学反应热放出的强间断面的传播。在化学反应区的末端面之前温度达到最大值、在末端面处温度有所下降。压力和密度的变化与压缩、膨胀程度有关,且都在前沿冲击波处达到最大值。随着化学反应的进行,生成的气体产物不断膨胀,压力和密度不断下降,在化学反应区末端面处,压力大约下降到前沿冲击波处压力的1/2,密度大约下降到前沿冲击波处密度的1/3。图2.1.1给出了爆轰过程中压力、密度、温度的变化,其中 $P_0, \rho_0, T_0$ 为初始压力、密度、温度; $P_Z, \rho_Z, T_Z$ 为炸药受到前沿冲击波的冲击压缩时的压力、密度、温度; $P_H, \rho_H, T_H$ 为化学反应完成后的爆轰产物的压力、密度、温度。

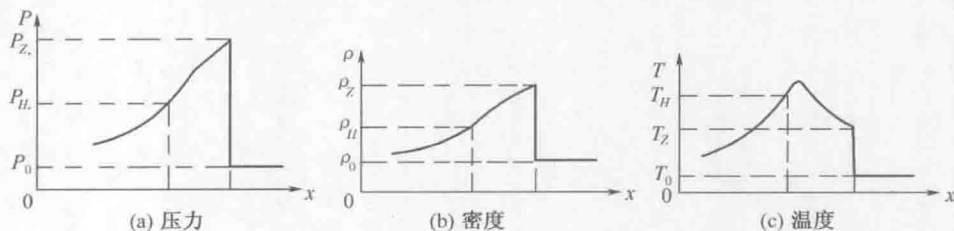


图 2.1.1 爆轰过程中状态参数的变化

#### 2.1.3 影响装药爆轰的多种因素

##### 1. 装药直径对爆速的影响

对于一定装药密度的药柱,爆速随着药柱直径的变化规律如下: