

爆炸作用与装药设计

孙业斌 等编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分八章。主要包括：爆炸作用特征；弹药传爆系列及主装药的设计原理；炸药对金属的加速作用；炸药在水中、土中的工程爆破及安全防护；爆炸加工及其应用。本书编写中，以流体力学理论为基础，重视基本概念，以通俗易懂的文字讲述数学的概念和方法。着重使理论联系实际，侧重于解决实际问题 and 计算方法。

本书可作为高等学校爆炸与装药及弹药系统等专业的教材，也可供从事本专业的科技研究人员和工程技术人员参考。

爆炸作用与装药设计

孙业斌 等编著

*

国防工业出版社出版

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

*

787×1092 1/16 印张 29¹/₂ 683千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷 印数：0,001—42,000册

ISBN7-118-00019-1/TJ3 定价：4.85元

前 言

在战争中，常规弹药和导弹战斗部都是通过炸药装药的爆炸来摧毁目标的。各种弹药对不同目标介质的爆炸作用，又紧密地依赖于装药的设计。关于满足一定爆炸作用的装药设计，有关书籍的内容都是一稍而过，这方面的论述甚少；国外资料也很少报导。因此，为了满足弹药设计的要求，我们就科研中的体会及收集到的部份资料，通过分析、综合和理论推导，提出了一些为满足某种爆炸作用要求，装药设计所遵循地一般理论原则和工程计算方法而编写成本教科书。

本书是一门“理论与实践”结合较紧密的教材。它是以炸药对金属的加速作用为主，结合炸药在空气中和密实介质中的爆炸作用，找出这些作用与装药设计和炸药爆轰参数的关系，提出提高产品威力的方案和实验途径。由于本学科处于发展中，所以，书内很多内容有待于今后进一步发展和丰富，使之能更加正确地指导各种爆炸作用与弹药的工程设计。

随着社会主义经济建设的飞速发展，炸药在民用爆破和爆炸加工中也日益得到了广泛地应用。如工程爆破、拆毁建筑物及其它构筑物；爆炸成型、爆炸焊接、爆炸切割、爆炸冲孔等。这些高效率的施工和加工方法，将在实现“四个现代化”的进程中，显示出更强大的生命力。为实现这些工程爆炸作用，不可避免地还是要与装药设计密切结合起来。本书在原来的基础上，增补了这部份内容，以适应社会主义建设的需要。

本书是按照 150 学时编写的。教学改革后，本教材可讲授 70~80 学时，实验课另单独开设。由于本教材是该专业的后续课，所以可增加一些自学章节，如第一、二、六、八章的部份内容，采用学生自学，教师课堂总结、答疑等方式进行。

我们希望，大学本科生能够通过学习这本书奠定爆炸与装药设计技术的基础；我们也希望书中对炸药装药有关问题的讨论以及威力设计思想的分析，能对从事弹药专业的工作人员起到参考作用；我们还希望这本书能引起从事工程爆破和爆炸加工方面技术人员的兴趣，从中获得他们所需要的知识。

这是一本内容较广的教材，编写过程中，除编入参加编写人员多年从事教学和科研取得的成果及经验外，有一些材料是取自国内、外有关书刊杂志、报告及专门出版物，因不能逐一列举，在此一并向原作者致谢！

本书第二、三、六、七、八章是由孙业斌同志编著的；第一、四章是由恽寿榕同志编著的；第五章是由张守中和王廷增同志编写的；由孙业斌同志担任主编。在编写过程中，许多科研单位的科学工作者给予了很大支持和帮助。华东工学院魏惠之同志审阅了全部书稿；兵器工业部第一编委会爆炸力学编审小组以及张世杰和午新民同志都对教材内容方面提出了宝贵意见；张宏同志描绘了全部插图。在此，表示衷心感谢！

书中的一些观点，只是一家之言，谬误之处在所难免，乞望不吝赐教。

主 编

1985年7月于北京

目 录

第一章 总 论

| | |
|--------------------|---|
| § 1-1 爆炸及其特征 | 1 |
| § 1-2 化学爆炸装置 | 2 |
| § 1-3 研究方法 | 4 |
| § 1-3-1 理论研究 | 4 |
| § 1-3-2 实验研究 | 4 |
| § 1-3-3 数值模拟 | 5 |

第二章 传爆系列和主装药

| | |
|-----------------------------|----|
| § 2-1 传爆系列 | 8 |
| § 2-1-1 传爆系列概述 | 8 |
| § 2-1-2 对传爆系列的要求 | 15 |
| § 2-2 传爆系列中常用的火炸药 | 16 |
| § 2-2-1 炸药的分类和用途 | 16 |
| § 2-2-2 炸药装药爆轰的成长及传播 | 17 |
| § 2-2-3 对炸药装药的要求及考虑原则 | 19 |
| § 2-3 设计中的一般考虑 | 23 |
| § 2-3-1 传爆药柱的设计原则 | 24 |
| § 2-3-2 主装药 | 29 |
| § 2-3-3 弹药装填系数的选择 | 37 |
| 参考文献 | 39 |

第三章 炸药对金属的加速作用

| | |
|----------------------------------|----|
| § 3-1 炸药对厚壁大锥角药型罩抛掷速度的工程计算 | 40 |
| § 3-1-1 圆柱形装药对平板的抛掷速度 | 40 |
| § 3-1-2 圆柱形装药对药型罩的抛掷速度 | 47 |
| § 3-1-3 截锥形装药对药型罩的抛掷速度 | 54 |
| § 3-2 金属破片的飞散速度 | 57 |
| § 3-2-1 格尼方程计算破片初速 | 57 |
| § 3-2-2 炸药的能量输出和传递效率 | 62 |
| § 3-2-3 格尼系数的工程计算方法 | 65 |
| § 3-2-4 计算破片初速的其它方法 | 66 |
| § 3-2-5 破片初速沿壳体的分布 | 72 |
| § 3-2-6 影响破片初速的因素 | 79 |
| § 3-3 破片运动学 | 83 |
| § 3-3-1 破片运动方程 | 83 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| § 3-3-2 杀伤破片的飞散特性 | 89 |
| § 3-4 杀伤标准及其确定 | 93 |
| § 3-4-1 杀伤标准 | 93 |
| § 3-4-2 对有生力量杀伤标准的确定 | 95 |
| § 3-5 破片对目标的作用 | 96 |
| § 3-5-1 破片对目标的贯穿作用 | 96 |
| § 3-5-2 破片的引燃作用 | 98 |
| § 3-5-3 破片的引爆作用 | 99 |
| § 3-6 控制破片的方法 | 99 |
| § 3-6-1 全预制破片 | 101 |
| § 3-6-2 壳体刻槽 | 101 |
| § 3-6-3 利用聚能效应 | 102 |
| § 3-6-4 缠制壳体 | 103 |
| § 3-6-5 圆环迭加壳体 | 103 |
| § 3-6-6 组合式壳体 | 104 |
| § 3-7 破片飞散速度的试验测定 | 104 |
| § 3-7-1 靶网测速法 | 104 |
| § 3-7-2 闪光×射线摄影测速法 | 106 |
| § 3-7-3 高速摄影测速法 | 106 |
| § 3-8 杀伤战斗部最有利装填系数的确定 | 108 |
| 参考文献 | 110 |

第四章 聚能效应

| | |
|------------------------------|-----|
| § 4-1 聚能现象 | 112 |
| § 4-2 聚能射流的形成过程 | 115 |
| § 4-2-1 射流形成过程实验研究 | 115 |
| § 4-2-2 射流在空气中的运动 | 120 |
| § 4-2-3 射流形成过程的流体力学理论 | 122 |
| § 4-2-4 流体——弹塑性理论的计算结果 | 136 |
| § 4-2-5 形成射流的临界条件 | 138 |
| § 4-2-6 射流形成过程参量的实验测定 | 141 |
| § 4-2-7 射流的颈缩与断裂 | 149 |
| § 4-3 聚能射流破甲过程 | 154 |
| § 4-3-1 射流破甲的基本现象 | 154 |
| § 4-3-2 破甲初始参数计算 | 158 |
| § 4-3-3 破甲过程的流体力学理论 | 159 |
| § 4-3-4 破甲参数的实验测定 | 171 |
| § 4-3-5 射流形成和破甲的几何相似 | 175 |
| § 4-4 影响破甲威力的因素 | 177 |
| § 4-4-1 现代坦克的防护技术 | 177 |
| § 4-4-2 炸高 | 178 |
| § 4-4-3 增加射流总能量 | 179 |

| | |
|----------------------------|-----|
| § 4-4-4 起爆不对称性 | 180 |
| § 4-4-5 药型罩压合的不对称性 | 183 |
| § 4-4-6 工艺条件对不对称性的影响 | 185 |
| 参考文献 | 187 |

第五章 空气中爆炸

| | |
|----------------------------------|-----|
| § 5-1 空气中爆炸的基本现象 | 189 |
| § 5-1-1 爆炸产物的膨胀 | 189 |
| § 5-1-2 炸药爆炸后空气冲击波的形成和传播 | 191 |
| § 5-1-3 装药形状和引爆位置对空气冲击波的影响 | 192 |
| § 5-1-4 炸药爆炸传给空气冲击波的能量 | 193 |
| § 5-1-5 空气中爆炸对目标的破坏作用 | 194 |
| § 5-2 空气冲击波的初始参数及其传播 | 194 |
| § 5-3 爆炸相似律 | 202 |
| § 5-3-1 基本知识 | 202 |
| § 5-3-2 π 定理 | 203 |
| § 5-3-3 相似现象 | 205 |
| § 5-3-4 相似律在空气爆炸中的应用 | 207 |
| § 5-3-5 其它能源的爆炸 | 212 |
| § 5-4 带壳弹药的爆炸 | 213 |
| § 5-4-1 静止弹药爆炸 | 213 |
| § 5-4-2 运动弹药的爆炸 | 217 |
| § 5-5 空气冲击波的实验测定 | 218 |
| § 5-6 空气冲击波对目标的作用 | 221 |
| § 5-6-1 空气冲击波在刚性壁面上的反射 | 221 |
| § 5-6-2 空气冲击波的环流作用 | 228 |
| § 5-7 空气中爆炸的破坏作用 | 230 |
| § 5-8 空气冲击波的通道效应 | 234 |
| § 5-8-1 冲击波在管道中的传播 | 235 |
| § 5-8-2 冲击波在膨胀室内的传播 | 238 |
| § 5-9 冲击波设防安全距离 | 239 |
| § 5-9-1 建筑物破坏等级 | 239 |
| § 5-9-2 冲击波设防安全距离公式 | 241 |
| § 5-9-3 土围墙的作用 | 244 |
| § 5-9-4 一面敞开型的围墙 | 246 |
| § 5-9-5 防爆墙 | 248 |
| § 5-9-6 覆土拱型弹药库 | 248 |
| § 5-9-7 地形的影响 | 249 |
| § 5-10 殉爆 | 250 |
| § 5-11 危险建筑物 (A级) 设防安全距离规范 | 251 |
| § 5-11-1 建筑物的危险等级 | 251 |

| | | |
|----------|------------------|-----|
| § 5-11-2 | A级建筑物的设防标准 | 252 |
| § 5-11-3 | 危险生产区 | 253 |
| § 5-11-4 | 总危险品仓库区 | 255 |
| § 5-11-5 | 销毁场 | 257 |
| 参考文献 | | 257 |

第六章 工程爆破

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----|
| § 6-1 | 土岩爆破的基本现象及药包计算原理 | 258 |
| § 6-1-1 | 爆破作用现象 | 258 |
| § 6-1-2 | 工程爆破的类型及药包计算 | 260 |
| § 6-2 | 爆破流体动力学理论 | 263 |
| § 6-2-1 | 速度势量场和速度场 | 263 |
| § 6-2-2 | 势量场的等值面 | 264 |
| § 6-2-3 | 共焦点椭球面的势函数 | 265 |
| § 6-2-4 | 速度势量和炸药能量间的关系, 常数 ζ 的确定 | 267 |
| § 6-2-5 | 能量密度 | 268 |
| § 6-2-6 | 临界速度和临界能量密度 | 270 |
| § 6-2-7 | 在无限介质中爆炸球形装药时速度势和速度矢量在场中的分布 | 274 |
| § 6-2-8 | 直列装药爆炸时的速度势及在场中的分布 | 275 |
| § 6-2-9 | 自由面对球形装药速度场的影响和爆破漏斗的形成 | 278 |
| § 6-2-10 | 装填系数和最有利埋设深度 | 283 |
| § 6-2-11 | 岩石的移动及破碎 | 286 |
| § 6-3 | 爆破参数计算与选择 | 291 |
| § 6-3-1 | 单位用药量系数 K | 291 |
| § 6-3-2 | 最小抵抗线 W | 292 |
| § 6-3-3 | n 值的选择 | 292 |
| § 6-3-4 | 药包间距 a | 293 |
| § 6-3-5 | W/H 的比值及不逸出半径 | 295 |
| § 6-3-6 | 可见漏斗深度 p | 295 |
| § 6-3-7 | 药包迟发间隔时间的计算与选择 | 296 |
| § 6-3-8 | 影响爆破效果的主要因素 | 298 |
| § 6-4 | 工业炸药及在爆破中的参数计算 | 300 |
| § 6-4-1 | 黑火药 | 300 |
| § 6-4-2 | 硝酸炸药 | 301 |
| § 6-4-3 | 铵油炸药 | 304 |
| § 6-4-4 | 浆状炸药 | 305 |
| § 6-4-5 | 工业炸药特征参数计算 | 308 |
| § 6-5 | 工程爆破安全距离 | 318 |
| § 6-5-1 | 安全距离的意义 | 318 |
| § 6-5-2 | 爆破的地震效应 | 318 |
| § 6-5-3 | 空气冲击波作用的危险范围 | 325 |
| § 6-5-4 | 个别碎块飞散的安全距离 | 326 |
| 参考文献 | | 329 |

第七章 水中爆炸

| | |
|----------------------------------|-----|
| § 7-1 水中爆炸的物理现象 | 330 |
| § 7-2 理想流体运动微分方程 | 334 |
| § 7-2-1 微分方程 | 334 |
| § 7-2-2 压力-密度关系式 | 334 |
| § 7-3 水中冲击波的初始参数 | 335 |
| § 7-4 水中爆炸的参数计算 | 337 |
| § 7-4-1 水中爆炸相似律 | 337 |
| § 7-4-2 自由面的影响 | 341 |
| § 7-5 气泡的运动 | 343 |
| § 7-5-1 不可压缩和无重流体的径向运动 | 343 |
| § 7-5-2 在重力作用下气泡的运动 | 350 |
| § 7-6 水中冲击波与障碍物的作用 | 353 |
| § 7-6-1 水中冲击波与可动无限平板的相互作用 | 353 |
| § 7-6-2 薄壁圆筒在内部水中冲击波作用下的变形 | 357 |
| § 7-7 水下爆破的药量计算 | 361 |
| § 7-7-1 炸药 | 362 |
| § 7-7-2 水底药包爆破 | 363 |
| § 7-7-3 水下钻孔爆破 | 366 |
| § 7-7-4 水下药室爆破装药量及爆破漏斗计算 | 371 |
| § 7-7-5 水塞爆破参数的确定 | 376 |
| § 7-8 水下爆炸的破坏作用及防护 | 380 |
| § 7-8-1 水下爆炸的破坏作用及公害 | 380 |
| § 7-8-2 水下爆炸的防护技术 | 383 |
| 参考文献 | 384 |

第八章 金属爆炸加工

| | |
|---------------------------------|-----|
| § 8-1 金属爆炸加工概述 | 385 |
| § 8-1-1 引言 | 385 |
| § 8-1-2 金属爆炸加工的发展 | 385 |
| § 8-1-3 爆炸加工的应用 | 386 |
| § 8-1-4 爆炸加工的特点 | 389 |
| § 8-2 能量传递的方法 | 389 |
| § 8-2-1 概述 | 389 |
| § 8-2-2 几何法 | 390 |
| § 8-2-3 能量法 | 391 |
| § 8-2-4 冲量法 | 395 |
| § 8-2-5 薄壁圆筒胀形的药量估算 | 397 |
| § 8-2-6 圆平板料成形封头时, 炸药量的估算 | 401 |
| § 8-3 爆炸成形机理 | 410 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| § 8-4 爆炸成形相似律 | 415 |
| § 8-4-1 爆炸成形相似律、相似准则和相似参数的导出 | 417 |
| § 8-4-2 爆炸成形相似参数的简化 | 420 |
| § 8-4-3 几何相似律和能量准则 | 422 |
| § 8-4-4 经验公式的建立 | 423 |
| § 8-5 爆炸焊接机理 | 424 |
| § 8-5-1 概述 | 424 |
| § 8-5-2 金属复板的运动规律 | 427 |
| § 8-5-3 波的形成机理 | 438 |
| § 8-6 爆炸焊接参数选择 | 442 |
| § 8-6-1 主要焊接参数 | 442 |
| § 8-6-2 焊接参数之间的关系 | 445 |
| § 8-6-3 合理焊接参数的选择 | 446 |
| 参考文献 | 453 |
| 附表 1 常用起爆药的主要性能数据 | 454 |
| 附表 2 常用部分猛炸药的主要性能数据 | 456 |
| 附表 3 炸药与金属和其它各种材料的相容性 | 458 |
| 附表 4 爆炸焊接已能组焊的金属材料 | 466 |

第一章 总 论

§ 1-1 爆炸及其特征

爆炸是自然界经常发生的现象，也是人类注意应用和研究的一个重要领域。对爆炸可作如下定义。

爆炸是大量能量在小体积内或小面积上迅速释放或者转化的现象。

爆炸按照能量的来源可分为三类

- (1) 核爆炸，释放裂变能或聚变能；
- (2) 化学爆炸，释放化学能；
- (3) 物理爆炸，释放物理能，或者物理能的转换。

下面举例说明爆炸现象

(1) 空中核爆炸，由核反应所释放的大量能量以硬 X 射线形式和弹壳蒸气的冲击波形式传播，被周围空气吸收，空气被加热到几百万度，放出 X 光射线和远紫外线，它们被周围的空气吸收，温度升高向外辐射可见光和热，形成一个光亮的火球。火球迅速扩张，速度和温度随着火球扩大而降低。当温度降到 $3 \times 10^6 \text{K}$ 左右时，火球内部的冲击波赶上火球并且超出火球向外扩张，在空气中形成强冲击波。

(2) 激光和固体作用，固体物质吸收光能，迅速升温，气化和等离子体化，产生高压，能量不断积累的结果向固体介质内传入冲击波。激光的作用面积很小，能量集中，在介质内产生的压力可达 10^{10}GPa 以上。光能迅速转变为热能、相变能和动能，转换功率可达 10^{15}W/m^2 ，属于物理爆炸。

(3) 脉冲放电，积聚在云层中的电荷，在小区域内迅速释放，将周围空气加热，产生冲击波，这就是雷电。大容量电容器，其储存的电能在一个小体积的负载电阻上释放，使负载电阻气化和膨胀，产生冲击波，转换功率可达 10^{15}W/m^2 ，属于物理爆炸。

(4) 射流侵彻钢靶，射流直径很小，仅数毫米，有巨大的动能。射流侵彻使靶的局部材料得到功能和变形能，形成穿孔，其转换功率可估算如下。

设射流与靶为同种材料，单位面积转换功率 E_f 由下式给出

$$E_f = \frac{1}{2}(v_f - u)\rho_f(v_f^2 - u^2)$$

式中 v_f 为射流速度，取 8000m/s ； u 为侵彻速度，取 4000m/s ； ρ_f 为材料密度，取 8910kg/m^3 ，代入上式得 E_f 为 $8.6 \times 10^{14} \text{W/m}^2$ 。

(5) 梯恩梯爆轰，取爆速 D 为 6700m/s ，爆热 Q 为 $6.82 \times 10^9 \text{J/m}^3$ ，则

$$E_f = DQ = 4.56 \times 10^{15} \text{W/m}^3$$

(6) 气相爆轰，以氢氧混合气为例，取 D 为 2820m/s ； Q 为 $7.18 \times 10^6 \text{J/m}^3$ 。则

$$E_f = 2.01 \times 10^{12} \text{W/m}^3$$

由上面估算可见，各种类型爆炸的单位面积转换功率（简称功率密度）均在 10^{10}W/m^2 以上，而燃烧约为 10^7W/m^2 数量级，但是不能以功率密度是否超过 10^{10}W/m^2 作

为爆炸的依据。例如，火药爆燃的功率密度可达 $10^{11}\text{W}/\text{m}^2$ ，并不称之为爆炸。尽管不能给出爆炸的定量标志，但是爆炸的特征可用高功率密度来表征。

核反应的功率密度很高，可达 $10^{22}\text{W}/\text{m}^3$ 以上，但是制造和控制困难，加以放射性污染，在目前技术条件下，难以广泛使用。物理爆炸形式多样，功率密度的范围也很广，但是其装置过于笨重，有的技术复杂，例如，大功率激光装置。若能缩小体积和质量，则是一项理想武器。美苏等军事强国正在致力于开发研究。化学爆炸的爆炸源和引爆装置的质量轻，体积小，制造和控制容易，因而得到了最广泛的应用，本教材主要研究化学爆炸的控制和应用。

战争总是带有突然性的，需要高度的机动性和灵活性，爆炸这种高功率密度的特征，适合战争的需要，而爆炸形式中又以化学爆炸最为适合，所以战争和炸药分不开了。

在战争中炸药和弹药的消耗量是巨大的，第一次世界大战的最后一年，英国的弹药消耗量达每天 100 万发，相当于每天消耗炸药 10^6kg ，每年 $3.6 \times 10^8\text{kg}$ 。第二次世界大战中炸药的消耗量最为惊人，在 1944 年法西斯德国最高统帅部向政府要求每月供应炸药 $5 \times 10^7\text{kg}$ ，相当于每年 $6 \times 10^8\text{kg}$ 。美国总共投到轴心圆上空的航弹达 $2 \times 10^9\text{kg}$ ，按装填系数 0.5 计，相当于每年 $6.5 \times 10^8\text{kg}$ 炸药，加上地面战争的消耗量，年产量就更多了，美国宣称能够年产 $2 \times 10^9\text{kg}$ 炸药，在 1944 年实际生产了 $1.1 \times 10^9\text{kg}$ 炸药。

自从有了核武器以来，一度曾认为核武器将决定战争胜负，现在美苏两国的核武器库已趋饱和，双方都认识到难以在核战争中保全自己，不敢轻易发动核战争。事实上，第二次世界大战结束以来，不断地发生局部的常规战争，世界各军事大国竞相发展常规武器，因此化学爆炸仍是世界各军事大国研究的主要课题。

爆炸除了应用于破坏目标外，在民用经济建设方面也得到了很广泛的应用。在开矿、筑路、铁道和水利建设等方面，大量采用爆破作业。另外在爆炸加工方面也得到了迅速的发展，如爆炸成形、爆炸焊接、爆炸硬化、爆炸切割、爆炸穿孔和爆炸压实等。爆炸技术的应用已进入到冶金、机械、石油、电力以及轻工等领域，甚至医疗和艺术领域也用上了爆炸技术。

总之，爆炸技术在和平时期并不是停止不前，而是在迅速发展着。就炸药消耗量来说，比第二次世界大战期间还要高，例如，美国 1981 年生产了 $2 \times 10^9\text{kg}$ 炸药，其中 85% 用于民用方面。

§ 1-2 化学爆炸装置

炸药是化学爆炸装置中的最主要材料，一个化学爆炸装置（以后简称化爆装置），一般包含有对炸药的起爆、传爆（扩爆）、爆轰波形控制和能量转换件等四个部件。以某种形式的小能量（初始冲能）输入于化爆装置，经过极短的时间，就能输出某种形式的大能量作用于目标，因此，化爆装置是一种增益很高的能量放大器或功率放大器。

起爆器（通常是雷管）是化爆装置的开关。以冲击波、热、摩擦、针刺、光和电等多种初始冲能形式使起爆器中的敏感炸药起爆，然后输出足以使下一级装药爆炸的能量。起爆器作为化爆装置的第一级放大器，其基本要求是

- (1) 有足够大的能量输出；
- (2) 起爆成功率高；

(3) 在指定的位置有输出能量;

(4) 有足够的不能起爆的能量阈值, 以保证安全。

对于某些起爆器中的主装药来说, 起爆器的能量输入尚嫌不够, 这就需要扩爆器。作为第二级放大器, 进一步放大输出能量以确保主装药全部爆炸, 并且使其爆轰性能达到该装药物理条件下的最大值。对于较钝感的炸药如注装或块装的 TNT、硝铵炸药等, 都需要扩爆器。扩爆器所装炸药的敏感程度介于雷管装药与主装药之间。

爆轰波形控制器(简称波形控制器)是将爆轰波形调整到所规定的形状, 其基本任务有两条: 一为使主装药按规定的次序起爆; 二为控制爆轰波对介质的入射角。

在聚能战斗部中广泛应用波形控制器, 可使其破甲深度提高10%~20%。杀伤战斗部中采用波形控制器, 以调整破片飞散角和飞散方向。在核战斗部及科学实验中都要用到波形控制器。

波形控制器有以下四类

(1) 高低爆速型, 通过高低爆速炸药的不同组合, 可以得到各种波形, 应用很广的平面波发生器便是一例。

(2) 惰性隔板型, 分两种情况: 一种为隔死型, 爆轰波遇到埋在炸药中的隔板时, 入射冲击波经过衰减后, 不能起爆隔板下面的炸药, 相当于爆轰波绕过隔板传播, 从而改变波形; 另一种为不隔死型, 隔板中的入射冲击波能够起爆隔板下面的炸药, 仅延迟了时间, 和由隔板侧面绕过来的爆轰波组合成波形。上两种情况在聚能战斗部中均有所应用。

(3) 飞板型, 例如为了得到平面波形, 可用爆炸驱动一飞板, 使其同时打击到平的炸药表面, 使炸药平面同时起爆而形成平面波, 此种波形控制器在爆炸合成金刚石中得到应用。

(4) 多点起爆型, 在杀伤战斗部中用二点或三点同时起爆, 以形成所需要的波形, 为了得到球面收敛波, 可在炸药球面均匀布满起爆点, 使其同时起爆。此种多点同时起爆技术相当复杂, 一种方法是用精确的等长的柔爆索接在球面各点上, 另一端合起来同时起爆, 使爆轰波通过等长的柔爆索同时到达炸药球体表面, 形成球面收敛波。另一种方法是在炸药球表面复盖铜箔, 箔上事先蚀刻出许多高阻点, 通以脉冲大电流, 使铜箔上各高阻点同时加热、汽化和引爆炸药, 从而形成球面收敛波。此种技术可以产生各种形状的曲面波形。

能量转换器是化爆装置的最后一个部件, 通过它输出能量。化爆装置可以输出多种能量形式, 如冲击波能、动能、光能、电能和磁能等, 按照能量转换的次数有以下三种

(1) 零次转换, 即化爆装置没有能量转换器, 直接输出主装药的爆轰能。

爆轰能作用于介质, 其能量形式基本有三种, 即冲击波能、变形能(包括弹塑性变形能和破碎能)以及动能。对于不同厚度的介质, 介质所得到的主要能量形式是不同的, 对于薄金属介质来说, 以动能为主, 对于半无限介质, 则以变形能和冲击波能为主, 对于中等厚度金属, 则三种能量形式兼而有之。爆轰能作用于空气, 输出能量形式为冲击波和气流, 在水中, 能量形式为冲击波、发生气泡和水流, 对土介质, 在接近地面时, 爆轰能使土壤压缩和变形, 向空中抛掷土块, 形成漏斗坑, 并向地下入射冲击波, 因此兼有三种能量形式。

(2) 一次转换, 例如杀伤战斗部, 爆炸驱动金属壳, 形成的破片携带动能杀伤远

距离目标,在此爆轰能转变成破片动能。又如科学实验中常用的氩光源,是爆轰能在氩气中产生冲击波,激发出强光(转换为光能)。

(3) 二次转换,聚能装药属二次转换,第一次是爆轰能转换为药型罩动能,第二次是药型罩动能转换为射流动能,转换的结果是能量密度提高了,某聚能装药的爆轰波阵面的能量密度为 $2 \times 10^{10} \text{J/m}^3$,药型罩被爆炸驱动向轴线压合时,能量密度可达 $3 \times 10^{10} \text{J/m}^3$,而射流的能量密度高达 $30 \times 10^{10} \text{J/m}^3$,比爆轰波大15倍。

对于常规武器来说,能量转换的目的有二,其一为增大远距离杀伤作用,装药爆炸后,由于爆轰产物膨胀,能量迅速分散,冲击波压力迅速下降,若将爆轰能转换成破片动能,则在空气中运动时,仅受空气阻力作用缓慢减速,对远距离目标仍基本保持原有的杀伤能力;其二为增加能量密度和单位面积的作用能量,用以摧毁硬目标,如装甲和金属结构等。

爆轰能可以转换成磁能和电能,如脉冲强电流发生器可产生 10^6A 脉冲电流,国外报导甚至可产生 $10^8 \sim 10^9 \text{A}$ 量级的强脉冲电流。此种装置有二次能量转换,以轴对称型脉冲强电流发生器为例,第一次是爆轰能转为金属圆管的动能,第二次是管壁运动压缩磁场,在回路上产生强电流,即转换为电能。

化爆装置的种类繁多,千差万别,但总可分为放大级(起爆和扩爆)、调整级(波形控制)和转换输出级,当然,简单的化爆装置可以不需要其中的某一级。

§ 1-3 研究方法

核爆炸压力达 10^3GPa 量级,超过了太阳中心的压力,温度达 10^9K 量级,属辐射流体力学范围。化学爆炸压力达 $(1 \sim 10) \text{GPa}$,超过了地球中心的压力,温度达 10^3K 量级,属化学流体力学范围。对于军用猛炸药,通常采用C-J假定,忽略爆轰化学反应区,则可以用流体力学处理。射流侵彻金属靶产生 $(1 \sim 100) \text{GPa}$ 的压力,温度达 $(10^2 \sim 10^3)^\circ \text{C}$,炸药对金属接触爆炸在金属中产生的压力和温度范围同上,而金属的动态强度极限为 1GPa 量级,因此在高压条件下,金属的强度效应可以忽略不计,当作流体,用流体力学方法处理。在中压和低压范围,要考虑金属的弹塑性,用固体动力学方法处理。对于化学爆炸以及对于周围介质的作用来说,伴随有化学效应、力学效应和物理效应(热、相变、光和电等),是一门综合性边缘学科,下面着重从力学方面研究,兼有流体力学和固体动力学两个方面。

对于爆炸作用和应用研究来说,可以从理论研究、实验研究和数值模拟三方面进行。

§ 1-3-1 理论研究

对于爆炸过程的每一环节:起爆、传爆、爆轰波形控制、能量转换、对周围介质的效应以及它们的作用机理,主要影响因素,特点等进行研究。对现象给以定性解释,尽可能给出主要参量的定量关系式,对于实际应用的化爆装置的设计和改进行提出理论依据和指导性意见,指导实验研究和数值模拟计算。

§ 1-3-2 实验研究

爆炸以数千米/秒的速度推进,整个过程在数十到数百微秒时间内完成,材料处于

高压、高速和高应变率状态，所以实验研究是一项很重要的基本方法。爆炸作用是强脉冲加载过程，压力高，历时短，破坏性大，给实验工作带来很大困难，目前常用的测试手段有以下几种

(1) 快速示波器，为了能够记录 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ s 的一次脉冲信号，不但要求示波器的频响高，还要求示波器有足够的亮度，苏联用提高电压的方法加亮，以OK系列示波器为代表。美国则对示波器进行了改进，以Tectronix公司生产的示波器为代表。比较优越的是记忆示波器和波形存贮器，可以直接输出数字化波形，它的频响低一些，正在不断改进和提高。

(2) 多通道频率计，虽然只记录过程的时间，但使用方便，可以多达36个通道，也是测试工作中常用的一种仪器。

(3) 可见光高速摄影仪可以用很高的拍摄频率将爆炸过程拍摄下来，应用最广泛的是转镜式相机，分狭缝扫描和分幅（时间放大）两种。现在有拍摄频率高达 10^7 1/s，扫描速度可达7000 m/s的仪器。采用变像管的高速摄影，不仅速度高，而且画幅大，如英国的IMACON-790，国内尚不能生产。序列脉冲激光高速摄影不用分幅镜头，而用可控的序列脉冲激光达到高速摄影的目的。现在国产的序列脉冲激光仪的脉冲间隔最短达 $8 \mu\text{s}$ ，它的优点是避免高速碰撞发光的干扰，画幅也比用分幅镜头法的大。

(4) 脉冲X光摄影的主要特点是能够拍摄爆炸驱动金属的瞬态图形，不受炸药层及爆炸光的影响，这也是可见光摄影做不到的。

为了进行爆炸测试还需要各种类型的传感器，在电测方面有各种形式的电探针、压电传感器、压阻型传感器、电磁速度和应力传感器等；在光测方面有各种形式的光探针和光探板，光导纤维的应用及爆炸光源等也是光测中常用到的技术。

§ 1-3-3 数值模拟

对于爆炸作用来说，一般要用到如下的关系式

- (1) 守恒方程，包括质量、动量和能量守恒方程；
- (2) 材料本构关系或状态方程；
- (3) 冲击波关系式；
- (4) 边界条件，包括爆轰产物和接触介质的耦合关系。

如果要考虑爆轰的化学反应过程，则还要加上与化学反应有关的方程。

以上所述是一个复杂的非线性方程组。如果把材料当作理想流体来处理，属于拟线性双曲型偏微分方程组，只能采用数值解。如要考虑材料的弹塑性，情况更为复杂。

高速大容量电子计算机的出现，能够解出上述爆炸力学复杂模型的数值解。许多过去曾经是无法计算的复杂过程，现在大都可以用计算机模拟和预告。目前在爆炸力学中，应用最广泛的是有限差分法。有限单元法虽然已进入动力学领域，但是在爆炸力学中用得还不多。计算中一般采用C-J假定，爆轰产物作为流体处理。对于金属介质，在早期的简单程序中采用流体模型，现在大多采用弹塑性模型，在计算中有一系列特殊问题需要解决，主要如下述。

(1) 强间断，与流体动力控制方程组相容的有限差分格式，原则上仅适用于连续函数。若遇到冲击波这样的强间断，由于参量在一个步长内跳动太大，致使差分计算无

法进行。现在用得最多的方法是人工粘性法，使得强间断在几个差分格子内平滑过渡，而对于整个计算区域来说，这几个格子又是足够小的，形成“几乎间断”，冲击波的速度和速度等参量和未加人工粘性前很接近，使得差分计算能够正常进行。最近发展起来的随机选取法，可以得到陡的冲击波形，但是用于二维计算时，尚不够成熟。

(2) 大变形，例如爆炸驱动金属问题，金属变形量很大，基于小变形的公式就不适用了。通常采用自然应变代替工程应变，在计算中要采取一系列措施才能保证正常进行。

(3) 多种介质，爆炸计算中，包含有几种介质，而且常常要求显示介质的内界面和外界面，为此又要采取许多措施。

(4) 爆轰波，在计算中要能自动显示爆轰波形，而且爆轰波所到之处，把化学能的释放考虑到守恒方程中去，一个方法是引入“燃烧函数”，使得爆轰波参量在几个格子内圆滑过渡，并释放化学能。

(5) 边界处理，各种边界的处理，常常是计算中的困难问题。例如真空边界，由于各参量在边界处变化很大，使计算难以进行。又如滑动边界，压力连续，密度不连续，界面的垂直速度分量连续，切向分量不连续，计算的难度也很大。

其它如起爆过程的数值模拟及材料断裂的数值模拟等都是当前正在积极研究的问题。

关于坐标系有拉格朗日坐标（简称拉氏坐标）和欧拉坐标两种，有的程序中兼用两种坐标。在拉氏坐标中，独立空间变量是以一个固定在介质中的坐标系（例如质点的初始空间坐标）为参考的，整个坐标系随着计算的进行而变动，质点在某时刻的真实空间坐标则作为因变量求得。在欧拉坐标中，独立空间变量是以一个固定在空间的坐标系为参考的，流体在空间的运动，以与时间有关的速度场来表征。拉氏坐标能比欧拉坐标提供更多的信息，而且质量守恒是自动满足的，即使对于差分近似来说也是精确的。因此，对于一维问题，大部分采用拉氏坐标，对于多维问题，由于计算格子的扭曲变形，用拉氏坐标计算时，精确度显著下降。当变形进一步加大时，可能出现计算格子的合并和交错，出现负质量，导致停机。这时，需要采取补救措施，通常用“重分网格”再解决。若计算网格扭曲不太大时，将流场重分为整齐的网格，然后再继续计算，这实际上引进了欧拉坐标的性质。还有一种是采用三角网格，当一个顶点接近对边时，格子内产生很大的压力将其“顶开”。

欧拉坐标能够适应大变形计算，但是对于包含多种介质的问题，不能显示介质的界面，而这常常是许多研究者所特别关心的，这是欧拉坐标系的一个严重缺点。改进的办法是在界面设置各种带有拉氏性质的示踪点或标记点，有的带有质量，参与守恒运算，有的没有质量，仅跟随边界运动，这样就可以计算多维、多种介质和大变形的问题了。

上面二种坐标系实际上是在一个计算程序中同时存在，但以某一种为主。于是又出现了一种“任意拉氏欧拉法”，该程序的坐标系可以根据需要方便地转换。从发展历史来看，首先发展的是拉氏坐标系法，遇到大变形问题，发展了欧拉坐标系法，进而发展了两种坐标系的混合法，现在则有相当一部分学者认为拉氏坐标系法更有发展前途。

现介绍几个常用典型程序的概况，HEMP程序是美国原子能委员会劳伦斯辐射实

实验室发展的。用拉氏坐标系，炸药—金属系统作为流体弹塑性体来考虑，可以计算轴对称破片飞散，接触爆炸条件下的成坑过程，弹塑性波在介质中的传播等二维的多种材料介质的强脉冲加载问题和高速碰撞问题。

HELP程序是美国哈奇门 (L. J. Hageman) 等人发展起来的，用欧拉坐标和拉氏示踪点。它适合处理材料的大变形问题，多层球壳的膨胀计算，弹丸高速碰撞，尖锥对水的冲击，陨石对球的碰撞，弹丸在空中弹道爆炸，聚能射流形成等等。

EPIC程序是汉奈威尔公司国防系统研究组的约翰逊 (G. R. Johnson) 发展的，用拉氏坐标和三角形有限元法。可以解决有复杂的边界条件和几何形状、大变形以及金属材料的高速变形等的计算问题。

其它名目繁多的程序还有很多，不再一一介绍了。从目前看来，二维不定常程序，在国外已经用于实际的研究和设计工作中，但国内还很少应用。至于三维数值计算，由于计时太长，难以实际应用。近年来出现了超大型计算机，如DC7600和CRAY等，使三维问题的计算有了实际应用的可能性。但跟着出现的是预处理和计算结果的后处理，不仅耗费时间和使用大量人力，而且硬件和软件都需要发展配套。

总之，从实用价值来看，大量应用的是一维程序，半解析半数值计算的程序，数据处理和优化设计等程序。二维程序由于价格昂贵，要慎重采用，三维程序只有在不得已时才采用。

第二章 传爆系列和主装药

§ 2-1 传爆系列

§ 2-1-1 传爆系列概述

对于战斗部和常规弹药来说，传爆系列是不可缺少的部分。随着弹种及其配用引信的不同，传爆系列的组成有各种形式。

配用起爆引信弹药的传爆系列，输出的主要是爆轰能；配用点火引信弹药的传爆系列，输出的主要是火焰冲能。为便于区别，习惯上称前者为爆炸装药的传爆系列，称后者为传火系列。如图2-1-1所示^{〔1〕}。

从图上可以看出，传火系列和传爆系列在组成上的主要区别是：前者无雷管、导爆药和传爆药。因此，传火系列可以看成是传爆系列的一种特殊形式，有关其设计的主要问题与传爆系列的设计基本近似。

典型的传爆系列，由以下爆炸元件组成转换能量的火工元件，包括火帽和雷管；控制时间的火工元件，包括延期管和时药盘；放大能量的火工元件，包括加强药柱、导爆药柱和传爆药柱。

对火药延期（包括气孔延期）和药盘时间（包括自炸药盘）传爆系列的第一个火工元件为火帽。少数短延期传爆系列，也有直接用延期雷管的。这种延期雷管，实质上是火帽、延期药和雷管的组合体。

瞬发性强的传爆系列的第一个火工元件一般为雷管（火焰雷管除外）。

延期管和时间药盘，其输出端一般都设有加强药柱（也叫扩燃药柱），以提供更强的火焰，使火焰雷管可靠起爆。但加强药柱通常不是独立的元件，它与延期药剂或时间药剂组成一体。只有在个别情况下，才作为一个独立的元件使用，此时也称为加强药管（如箭引—1的加强药管）。

气孔延期不用延期药和加强药，是让火焰经过空腔或小孔直接引爆雷管，可得到百分之几秒的延期时间。

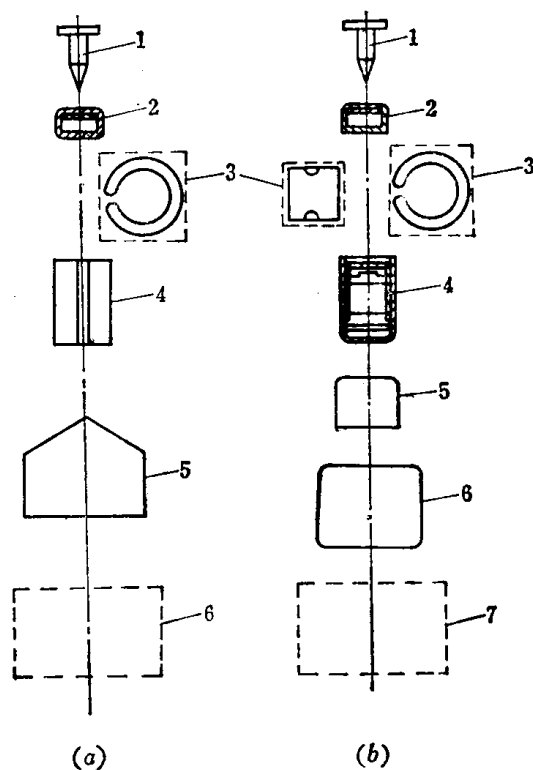


图2-1-1 传爆系列和传火系列

- (a) 传火系列 1—击针；2—火帽；3—时间药盘；4—加强药柱；5—传火药；6—抛射药。
(b) 传爆系列 1—击针；2—火帽；3—时间药盘；4—雷管；5—导爆药柱；6—传爆药柱；7—主装药。