

687151

2326

7/604

KONGZHONG  
BAOZHA

[美] W.E. 贝克 著

空中爆炸

原子能出版社

# 空 中 爆 炸

[美] W.E. 贝克 著

江 科 译

陈树凯 校

原 子 能 出 版 社

## 内 容 简 介

本书是一本空中爆炸理论和测试技术方面的参考书。全书共分十章：一般现象学、空中爆炸波理论、爆炸波相似律、计算方法、空中爆炸波试验、汇编的爆炸波数据、空中爆炸波传感器、仪表系统、空中爆炸波摄影术和数据处理。本书的特点是：有大比例尺的空中爆炸波参数图，对空中爆炸技术的有关文献作了详尽的评论，还给出了大量的参考资料。

本书适用于从事爆炸力学理论研究和试验、防爆工程设计以及其它有关气动技术研究的工程技术人员。

ENGINEERING DESIGN HANDBOOK

EXPLOSIONS IN AIR

PART ONE

W.E. Baker

1974

## 空 中 爆 炸

[美] W.E. 贝克 著

江 科 译

陈树凯 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本  $787 \times 1092^{1/32}$  · 印张  $12^{3/4}$  · 字数 285 千字

1982 年 10 月第一版·1982 年 10 月第一次印刷

印数 001—1700·统一书号：15175·424

定价：1.55 元

## 原 序

对炸药源产生的爆炸波在空气中的形成和传递过程的科学上的兴趣至少可追溯到十九世纪后半叶。在第二次世界大战期间，空中爆炸波现象学的实验和分析研究成果发表的数目显著地增加了。尽管对这个课题有大量的文献，可是至今还没有一本足够全面的包括空中爆炸波技术的理论和实验两方面的参考书。本手册试图改善这种情况。

《空中爆炸，第一部分》<sup>1)</sup>是该课题的一本一般参考手册，想提供给临时的和有经验的空中爆炸波理论和实验的研究人员使用。本手册的一个特色是有大比例尺的比例空中爆炸波参数图，并对空中爆炸波技术有关的文献作了详尽的评论，还给出了大量的参考文献。

本手册包括一般现象学、空中爆炸波理论、爆炸波相似律、计算方法、空中爆炸波实验、汇编的爆炸波数据、空中爆炸波传感器、仪表系统、空中爆炸波摄影术和数据处理方法等十章。用许多图表来作说明。本手册特地排除了空中爆炸波技术有密级的方面，如击波管那样的实验室应用和结构对爆炸波荷载的响应。这些课题在《空中爆炸，第二部分》AMCP706-182 (S) 中提出。

本手册是得克萨斯州圣安尼奥的西南研究所为美国陆军资料司令部的主要承包者杜克大学工程手册处编制的。作者是 W.E. 贝克博士。由弹道研究实验室、皮卡菲尼兵工厂和美国陆军电子学司令部的代表组成的委员会提供技术指导和

1) 即本书。——译者注

AMCP 706/1

协调。该委员会的成员是：主席 C.N.金埃里，W.J.泰勒，R.W.科利特和 C.戈尔迪。

本工程设计手册分成两种，一种可以公开和出售，另一种由于安全的原因而保密。陆军资料司令部的政策是按照 1966 年 9 月 9 日以来实行的陆军条令 70-31，对国防部其它部门及他们的承包者、其他政府机构公开这些工程设计手册。人们将注意到，这些手册的主要内容可以从国家技术资料服务处（NTIS）得到。

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 原序.....                | 1  |
| 第一章 一般现象学.....         | 1  |
| 1-0 符号表.....           | 1  |
| 1-1 爆炸的定义.....         | 2  |
| 1-2 爆炸波特性.....         | 3  |
| 1-3 在自由空气中的理想爆炸波.....  | 4  |
| 1-3.1 测量到的主击波特性.....   | 4  |
| 1-3.2 主击波特性的函数形式.....  | 5  |
| 1-3.2.1 压力-时间历程.....   | 5  |
| 1-3.2.1.1 正相.....      | 5  |
| 1-3.2.1.2 负相.....      | 8  |
| 1-3.2.2 粒子速度和其他参数..... | 8  |
| 1-3.3 二次和三次击波的特性.....  | 8  |
| 1-4 非理想的爆炸波.....       | 10 |
| 1-4.1 在自由空气中.....      | 10 |
| 1-4.2 地面效应.....        | 11 |
| 1-5 爆炸波的反射和绕射.....     | 13 |
| 1-5.1 平面波的反射.....      | 13 |
| 1-5.1.1 反射的类型.....     | 13 |
| 1-5.1.1.1 正反射.....     | 13 |
| 1-5.1.1.2 规则斜反射.....   | 14 |
| 1-5.1.1.3 马赫反射.....    | 15 |
| 1-5.1.2 反射过程.....      | 16 |

## II

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 1-5.1.2.1 强击波         | 16 |
| 1-5.1.2.2 弱击波         | 19 |
| 1-5.2 平面击波的绕射         | 20 |
| 1-5.2.1 二维刚性厚壁        | 20 |
| 1-5.2.2 三维块状结构        | 21 |
| 1-5.2.3 圆柱            | 23 |
| 1-6 对爆炸波的影响           | 25 |
| 1-6.1 源的形状即对称性对爆炸波的影响 | 25 |
| 1-6.1.1 普通的形状         | 25 |
| 1-6.1.1.1 直线装药        | 26 |
| 1-6.1.1.2 腔口爆炸波       | 27 |
| 1-6.1.1.3 大平面装药       | 27 |
| 1-6.1.2 距离的影响         | 27 |
| 1-6.2 远区聚焦            | 28 |
| 1-6.2.1 均匀介质          | 28 |
| 1-6.2.2 非均匀介质         | 29 |
| 1-6.2.2.1 理论          | 30 |
| 1-6.2.2.2 实践          | 30 |
| 1-6.3 不同类型的能源引起的变化    | 34 |
| 1-6.3.1 化学炸药          | 34 |
| 1-6.3.2 核炸药           | 36 |
| 1-6.3.3 其他源           | 37 |
| 参考文献                  | 39 |
| 第二章 空中爆炸波理论           | 44 |
| 2-0 符号表               | 44 |
| 2-1 总论                | 46 |
| 2-2 基本方程              | 47 |

|         |                   |    |
|---------|-------------------|----|
| 2-2.1   | 坐标系               | 47 |
| 2-2.2   | 方程组的形式            | 48 |
| 2-2.2.1 | 拉格朗日形式            | 48 |
| 2-2.2.2 | 欧拉形式              | 49 |
| 2-2.3   | 兰金-雨贡纽条件          | 50 |
| 2-2.4   | 单一空间变量的情况         | 51 |
| 2-2.4.1 | 线性流               | 52 |
| 2-2.4.2 | 球对称流              | 52 |
| 2-2.4.3 | 柱对称流              | 53 |
| 2-2.4.4 | 应用                | 53 |
| 2-3     | 方程组的解析解           | 54 |
| 2-3.1   | 球对称爆炸波的泰勒相似解      | 54 |
| 2-3.2   | 解的初始条件            | 60 |
| 2-3.2.1 | 初始等温的球形爆轰阵面       | 60 |
| 2-3.2.2 | 其他初始条件            | 62 |
| 2-3.3   | 马赫击波反射            | 63 |
| 2-3.4   | 一些新理论             | 71 |
| 2-3.4.1 | 爆炸波的弱击波区          | 71 |
| 2-3.4.2 | 中等和强的击波强度的情况      | 72 |
| 2-3.5   | 空气爆炸波“时间常数”的西尔海默解 | 78 |
| 2-4     | 有关方程摘要            | 82 |
| 2-4.1   | 基本运动方程            | 83 |
| 2-4.2   | 兰金-雨贡纽条件          | 83 |
| 2-4.3   | 球对称流的基本方程         | 83 |
| 2-4.4   | 泰勒相似解             | 84 |
| 2-4.5   | 击波初始衰减的西尔海默解      | 84 |
|         | 参考文献              | 85 |

## IV

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| <b>第三章 爆炸波相似律</b> ..... | 89  |
| 3-0 符号表.....            | 89  |
| 3-1 引言.....             | 91  |
| 3-2 爆炸波参数比例定律.....      | 92  |
| 3-2.1 霍普金森比例定律.....     | 92  |
| 3-2.1.1 定义.....         | 92  |
| 3-2.1.2 试验证明.....       | 94  |
| 3-2.1.3 概论.....         | 98  |
| 3-2.1.4 模型分析.....       | 99  |
| 3-2.2 萨克斯比例定律.....      | 103 |
| 3-2.2.1 假设.....         | 106 |
| 3-2.2.2 模型分析.....       | 106 |
| 3-2.2.3 试验证明.....       | 110 |
| 3-2.2.4 应用.....         | 113 |
| 3-2.3 爆炸波参数的其他比例定律..... | 114 |
| 3-2.3.1 附加爆源参数.....     | 114 |
| 3-2.3.2 小比例距离.....      | 116 |
| 3-2.3.3 韦肯定律.....       | 118 |
| 3-3 与结构相互作用的比例定律.....   | 121 |
| 3-3.1 “复印”比例定律.....     | 121 |
| 3-3.2 脉冲荷载比例定律.....     | 122 |
| 3-3.3 导弹对空中爆炸波的响应.....  | 125 |
| 3-4 比例定律的局限性.....       | 125 |
| <b>参考文献</b> .....       | 128 |
| <b>第四章 计算方法</b> .....   | 131 |
| 4-0 符号表.....            | 131 |
| 4-1 概论.....             | 133 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 4-2 含有不连续冲击波阵面的方法         | 134 |
| 4-2.1 柯克伍德和布林克利方法         | 134 |
| 4-2.2 格兰斯托姆方法             | 140 |
| 4-2.3 特征线方法               | 141 |
| 4-3 虚拟粘性法                 | 146 |
| 4-3.1 布罗德方法               | 147 |
| 4-3.2 WUNDY 编码和 LSZK 状态方程 | 152 |
| 4-4 PAF 算法                | 160 |
| 4-4.1 约束方程式               | 161 |
| 4-4.2 有限差分形式              | 163 |
| 4-4.2.1 邻域                | 165 |
| 4-4.2.2 力                 | 166 |
| 4-4.2.2.1 无耗散             | 166 |
| 4-4.2.2.2 耗散              | 169 |
| 4-4.3 试验实例                | 171 |
| 4-4.3.1 绕楔流               | 171 |
| 4-4.3.2 绕钝头圆柱体流           | 172 |
| 4-4.3.3 绕圆锥体流             | 173 |
| 4-5 PIC 算法                | 175 |
| 4-5.1 状态方程                | 176 |
| 4-5.2 二维问题的演算             | 177 |
| 4-5.2.1 计算的第一阶段           | 177 |
| 4-5.2.2 计算的第二阶段(物质的迁移)    | 180 |
| 4-5.2.3 计算的第三阶段(运动函数)     | 181 |
| 4-5.3 其他边界条件              | 182 |
| 4-6 FLIC 方法               | 186 |
| 4-6.1 计算网格                | 186 |

## VI

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 4-6.2 差分方程 .....       | 187 |
| 4-6.2.1 第一步 .....      | 187 |
| 4-6.2.2 第二步 .....      | 190 |
| 4-6.2.3 边界条件和稳定性 ..... | 192 |
| 4-7 各种方法的比较 .....      | 193 |

|            |     |
|------------|-----|
| 参考文献 ..... | 195 |
|------------|-----|

## 第五章 空中爆炸试验 .....

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 5-0 符号表 .....             | 200 |
| 5-1 概论 .....              | 201 |
| 5-2 爆炸波数据的单位和量纲 .....     | 201 |
| 5-3 “自由大气”测量 .....        | 202 |
| 5-4 地面爆炸测量 .....          | 210 |
| 5-5 马赫波和斜反射波的测量 .....     | 220 |
| 5-6 正反射波的测量 .....         | 223 |
| 5-7 实际高度和模拟高度条件下的测量 ..... | 226 |
| 5-8 系列爆炸的测量 .....         | 229 |
| 5-9 爆炸波参数的测量准确度 .....     | 232 |

|            |     |
|------------|-----|
| 参考文献 ..... | 234 |
|------------|-----|

## 第六章 空中爆炸波参数汇编 .....

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 6-0 符号表 .....                                                | 238 |
| 6-1 概论 .....                                                 | 240 |
| 6-2 空中爆炸波汇编资料的来源 .....                                       | 240 |
| 6-3 空中爆炸波参数图表的产生 .....                                       | 242 |
| 6-3.1 冲击波阵面参数 .....                                          | 245 |
| 6-3.1.1 兰金-雨贡纽方程 .....                                       | 245 |
| 6-3.1.2 用超压( $\bar{P}$ , $\leq 3.5$ )表示的理想气体条件下各参数的表达式 ..... | 245 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 6-3.1.3 用冲击波速度表示的理想气体条件下各     |     |
| 参数的表达式 ( $U \leq 2.0$ ) ..... | 246 |
| 6-3.2 冲量和作用时间 .....           | 252 |
| 6-3.3 时间常数和初始衰减率 .....        | 256 |
| 6-3.4 斜反射波数据 .....            | 258 |
| 6-3.5 换算因子 .....              | 266 |
| 6-4 计算举例 .....                | 267 |
| 参考文献 .....                    | 271 |
| 第七章 空中爆炸波传感器 .....            | 274 |
| 7-0 符号表 .....                 | 274 |
| 7-1 概论 .....                  | 274 |
| 7-2 压力传感器 .....               | 275 |
| 7-2.1 静压计 .....               | 275 |
| 7-2.1.1 BRL 静压计 .....         | 276 |
| 7-2.1.2 西南研究所静压计 .....        | 277 |
| 7-2.1.3 大西洋研究协会静压计 .....      | 278 |
| 7-2.1.4 英国的静压计 .....          | 278 |
| 7-2.1.5 其他静压计 .....           | 279 |
| 7-2.2 反射压力计 .....             | 280 |
| 7-2.3 小型压力计 .....             | 281 |
| 7-2.3.1 BRL 小型传感器 .....       | 283 |
| 7-2.3.2 兰利研究中心小型传感器 .....     | 284 |
| 7-2.3.3 其他小型传感器 .....         | 285 |
| 7-3 到达时间传感器和零时标记 .....        | 290 |
| 7-4 总压传感器和拖曳力传感器 .....        | 293 |
| 7-4.1 总压传感器 .....             | 294 |
| 7-4.2 拖曳力传感器 .....            | 295 |

## VIII

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 7-4.2.1 约翰逊和尤因的拖曳传感器       | 295 |
| 7-4.2.2 NOL 拖曳力传感器         | 296 |
| 7-4.2.3 SRI 拖曳力探头          | 297 |
| 7-4.2.4 BRL 双轴向拖曳计         | 297 |
| 7-5 密度计                    | 298 |
| 7-6 冲量传感器                  | 300 |
| 7-6.1 自由活塞传感器              | 300 |
| 7-6.2 滑动活塞计                | 301 |
| 7-6.3 弹簧活塞计                | 301 |
| 7-7 各种机械计                  | 302 |
| 7-7.1 形变计                  | 302 |
| 7-7.2 峰值压力计                | 305 |
| 7-8 小结                     | 308 |
| 参考文献                       | 315 |
| 第八章 仪表系统                   | 318 |
| 8-1 概论                     | 318 |
| 8-2 地面仪表系统                 | 318 |
| 8-2.1 阴极射线管系统              | 318 |
| 8-2.1.1 BRL 的 CRT 系统       | 319 |
| 8-2.1.2 CEC5-140 型 CRT 系统  | 321 |
| 8-2.1.3 英国 CRT 系统          | 321 |
| 8-2.1.4 DENVER 研究所的 CRT 系统 | 322 |
| 8-2.1.5 兰利研究中心的 CRT 系统     | 322 |
| 8-2.1.6 其他 CRT 系统          | 323 |
| 8-2.2 磁带系统                 | 323 |
| 8-2.3 振子示波器系统              | 325 |
| 8-2.4 瞬时记录器                | 326 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 8-2.5 与核爆炸有关的仪表问题               | 327 |
| 8-2.5.1 TREE                    | 328 |
| 8-2.5.2 EMP                     | 328 |
| 8-2.5.2.1 EMP 的产生               | 329 |
| 8-2.5.2.2 靠近表面的爆炸               | 329 |
| 8-2.5.2.3 自由空中爆炸                | 329 |
| 8-2.5.2.4 EMP 和系统的相互作用          | 330 |
| 8-2.5.2.4.1 传感器                 | 330 |
| 8-2.5.2.4.2 进入电缆的感应电流           | 330 |
| 8-2.5.2.4.3 记录系统                | 331 |
| 8-3 便携式系统                       | 332 |
| 8-3.1 振子示波器系统                   | 332 |
| 8-3.2 磁带记录系统                    | 333 |
| 8-3.2.1 Leach MTR-1200 记录器      | 333 |
| 8-3.2.2 Genisco Data 10-110 记录器 | 334 |
| 8-3.2.3 典型的便携式磁带记录系统            | 335 |
| 8-3.3 自记仪                       | 339 |
| 8-3.3.1 爆炸波压力传感器                | 340 |
| 8-3.3.2 时标                      | 342 |
| 8-3.3.3 起动方法                    | 342 |
| 8-3.3.4 加速方法                    | 343 |
| 8-4 标定方法                        | 346 |
| 参考文献                            | 350 |
| 第九章 爆炸波摄影术                      | 353 |
| 9-1 概论                          | 353 |
| 9-2 电影摄影装置                      | 353 |
| 9-2.1 低速分幅摄影机                   | 353 |

## X

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 9-2.2 高速分幅摄影机           | 354 |
| 9-2.2.1 旋转棱镜摄影机         | 354 |
| 9-2.2.2 旋转鼓轮摄影机         | 356 |
| 9-2.2.3 旋转反射镜摄影机        | 357 |
| 9-2.2.4 象分解摄影机          | 359 |
| 9-3 条纹摄影装置              | 361 |
| 9-4 静止摄影装置              | 362 |
| 9-4.1 一般摄影机             | 362 |
| 9-4.2 高速快门摄影机           | 363 |
| 9-4.3 变象管摄影机            | 364 |
| 9-5 阴影装置和纹影装置           | 367 |
| 9-5.1 阴影装置              | 367 |
| 9-5.2 纹影装置              | 368 |
| 9-6 空中爆炸波摄影方法           | 369 |
| 参考文献                    | 375 |
| 第十章 数据处理方法              | 376 |
| 10-0 符号表                | 376 |
| 10-1 概论                 | 376 |
| 10-2 胶卷和纸带图迹的处理         | 377 |
| 10-2.1 记录的类型            | 377 |
| 10-2.2 记录的判读            | 380 |
| 10-2.3 关于仪器尺寸和流动效应的记录修正 | 381 |
| 10-2.4 动压数据的处理          | 383 |
| 10-2.5 正相持续时间的确定        | 385 |
| 10-3 磁带数据的处理            | 388 |
| 10-4 自记仪数据的处理           | 389 |
| 10-5 运动或静止相片的数据处理       | 389 |
| 10-6 其他数据处理             | 392 |
| 参考文献                    | 393 |

# 第一章 一般现象学

## 1-0 符号表

$A$  = 三波点路径

$a, b, c, f, g, h$  = 常数

$C, C'$  = 装药中心; 象中心

$E$  = 总炸药能

$I$  = 入射波阵面

$I_+^*$  = 正相冲量

$I_-^*$  = 负相冲量

$L$  = 爆炸源的最大特征尺寸

$M, M', M''$  = 马赫杆阵面的位置

$P_r$  = 反射波的静超压

$P_0, P_0'$  = 绕射的马赫杆

$P_+, P_+^*, P_-^*$  = 入射波的静超压, 正相超压, 负相超压

$\overline{P}_r$  = 无量纲压力比

$p$  = 绝对压力

$p_0$  = 环境压力

$q$  = 动压

$R$  = 反射波阵面, 或离爆心的距离

$r$  = 径向柱坐标

$r_0$  = 爆炸源的特征尺寸

$S$  = 滑移流位置

$Sf$  = 反射表面位置

$T$  = 三波点

$T^+$ ,  $T^-$  = 正相持续时间, 负相持续时间

$t$  = 时间

$t_a$  = 爆炸波到达时间

$U$  = 入射波的速度

$U_r$  = 反射波的速度

$u$  =  $t$  时刻的粒子速度; 风速

$u_0$  = 环境空气中的粒子速度

$u_i$  =  $t = 0$  时刻的粒子速度

$u_r$  = 反射波的粒子速度

$V$  = 总体积

$V_1$ ,  $V_2$  = 涡的位置

$W$  = 炸药装药质量

$z$  = 轴向柱坐标

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\nu$  = 常数

$\alpha_i$ ,  $\alpha_R$ ,  $\alpha_{crit}$  = 描述斜反射击波几何性质的各种角度

$\gamma$  = 比热比

$\theta$ ,  $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_0$  = 温度, 入射波温度, 反射波温度,  
环境空气温度

$\lambda_i$  = 击波半径

$\rho$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_r$ ,  $\rho_0$  = 密度, 入射波密度, 反射波密度,  
环境空气密度

$\phi$  = 三波点相对地面的倾角

## 1-1 爆炸的定义

“爆炸”这个词被“韦氏辞典”定义为: “爆炸: 一种