

云雾爆轰

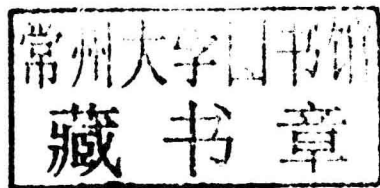
白春华 梁慧敏 李建平 张奇◎著



科学出版社

云雾爆轰

白春华 梁慧敏 著
李建平 张 奇



科学出版社

北京

内 容 简 介

云雾爆轰是爆轰学的重要组成部分,是由云爆武器发展推动形成的一门新兴科学。主要研究问题包括:云雾爆轰燃料、云雾爆轰控制、云雾爆轰威力评价等。

本书内容包括绪论和三篇共9章内容。在绪论中主要介绍了云雾爆轰特点及其发展过程等内容。在第一篇中,系统地介绍了处于当前领先水平的固液混合云爆燃料的设计理论与研究方法,并进一步介绍了典型两次引爆型和一次引爆型云爆燃料作用机理、配方设计以及主要性能等内容。在第二篇中,分别介绍了两次引爆型和一次引爆型云雾爆轰控制理论与技术,并较系统地介绍了两次引爆型子母式航空云爆弹技术。在第三篇中,介绍了云爆威力测试方法和云爆威力评价方法,以及基于实验测试结果计算云爆等效 TNT 当量方法等。本书包含较完整的云雾爆轰内容,且绝大部分内容是作者的科研成果,具有系统性和先进性。

本书可作为从事云雾爆轰基础与应用科学研究的参考书,同时可作为力学、安全科学与工程、兵器科学与技术等学科教师和学生教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

云雾爆轰/白春华等著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-035185-2

I. ①云… II. ①白… III. ①爆炸-研究 IV. ①O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 167172 号

责任编辑:张 析 刘志巧 / 责任校对:林青梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2012年7月第一次印刷 印张:19 插页:4

字数:432 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

今年是本人从事云雾爆轰问题研究二十年,其他几位作者也都有十年以上的研究经历。出版本书的第一个目的是对我们的研究工作做总结,为当前和今后从事相关工作或有兴趣的人员提供参考。同时,也作为对二十年风风雨雨日子的纪念。另一个目的是想表明我们对有关云雾爆轰问题的观点和认识,试图为今后正确开展云雾爆轰基础和应用研究起到一定作用。

云雾爆轰是爆轰学的重要组成部分,主要研究问题包括:云雾爆轰燃料、云雾爆轰控制、云雾爆轰威力评价等。云雾爆轰具有军民两方面应用背景,最突出的应用背景是云爆武器,通常称云爆弹。云雾爆轰理论与技术是由云爆弹推动发展起来的,也可以说没有云爆弹的推动就没有今天云雾爆轰理论与技术的发展。

云爆弹是20世纪60年代美国首先发展起来的一种新概念武器装备,它改变了常规武器弹药的理念,是常规武器发展的一场革命。云爆弹装填的不是炸药,而是不含氧或含少量氧的燃料。在武器战斗部到达目标处首先依靠云雾形成控制结构将战斗部装填的燃料向空气中分散,形成燃料空气云雾(也叫燃料空气炸药)。当燃料空气云雾达到理想爆轰状态时,通过云雾爆轰控制结构起爆燃料空气云雾,实现大范围爆轰。大范围爆轰,也叫体积爆轰,是云爆弹的突出特点。大范围爆轰直接作用和由其产生的冲击波作用是目标毁伤的主要因素。

有关云爆弹特点及其发展过程,在本书绪论(第1章)中做了介绍。由于云爆弹具有较复杂作用机理、结构构成和毁伤效应,再加上近年来温压武器的出现,使我国云爆弹研制中出现了混乱局面。有的把混合炸药当成了云爆装药,有的将云爆弹研制成了常规爆破弹等。在此,有必要澄清云爆弹的判别标准和云爆弹关键技术,希望不要出现概念和认识错误,不再研制出错误产品,不给国家带来重大损失。

云爆弹判别标准,回答什么是云爆弹。判别云爆弹的标准是,战斗部终点作用过程首先具有装填燃料与空气混合过程,形成大体积爆轰反应区,空气中氧气须作为氧化剂参与爆轰反应并对爆轰状态提高起到作用。正如前面所说,形成燃料空气云雾并实现体积爆轰是云爆弹的核心特征,同时也是判别是否云爆弹的标准。

云爆弹研制关键技术,回答怎么研制云爆弹。研制云爆弹最重要的技术是战斗部系统匹配技术,也就是说云爆弹战斗部系统各组成部分匹配好坏决定云爆弹的性能。云爆弹战斗部系统主要组成部分包括:装填燃料、弹体结构、引信以及减速伞等。系统匹配技术研究的核心内容是,以实现最大云雾爆轰威力为目标,确定战斗部系统各组成部分匹配关系。

云雾爆轰在民用上也具有很好的应用前景。由于云雾爆轰具有体积爆轰的特点,在约束空间内能够对约束物体产生直接的爆轰作用,可以对约束物体产生有效均匀破坏。

因此,云雾爆轰技术可以应用到爆破控制工程中建筑物拆除。此外,基于云雾爆轰过程消耗空气中氧气并产生大范围冲击波等特点,可以利用云雾爆轰过程实现有效扑灭火灾。

本书包含了云雾爆轰问题的主要内容,共分三篇,分别是:云雾爆轰燃料、云雾爆轰控制和云雾爆轰威力评价。书中绝大部分内容是我们的科研成果。在内容设置上,力求具有系统性和先进性,成为我国乃至世界有关云雾爆轰方面的第一本专著。

第一篇包括 3 章。首先介绍了固液混合云爆燃料及其特点(第 2 章)。系统地介绍了处于当前领先水平的固液混合云爆燃料的设计理论与研究方法,包括新型固液混合燃料结构状态,燃料中固、液以及气泡之间相互作用以及研究固液混合燃料理化性能方法和固液混合燃料制备与装填方法等。然后主要介绍了在新型固液混合燃料设计理论指导下,研制成功的典型两次引爆型云爆燃料(第 3 章)和一次引爆型云爆燃料(第 4 章)作用机理、配方设计以及主要性能等内容。这样既介绍了先进云爆燃料研究方法,同时又提供了具有直接参考价值的数据结果。

第二篇包括 3 章。首先分别介绍了两次引爆型云爆控制(第 5 章)和一次引爆型云爆控制(第 6 章)理论与技术。两次引爆型云爆控制技术包括:定点强起爆方法、燃料分散装药结构、子母式弹体结构和整体式弹体结构等。这些内容构成了实现两次引爆型云爆可靠控制的系统技术,并结合先进的两次引爆型固液混合燃料给出了具体结构形式以及实验和计算结果。一次引爆型云爆控制技术核心是实现云爆燃料边分散边爆轰,具体内容包括:分散起爆方法、分散起爆装药结构、强弹体结构以及装药质心控制结构等。这些内容能够满足不同弹种弹体结构设计需要。最后较系统地介绍两次引爆型子母式航空云爆弹技术(第 7 章)。同时满足两次引爆型、子母式、航空炸弹要求的云爆弹,是系统复杂、研究难度较大的弹种,也是最适合装备的弹种,本书有必要将经过千辛万苦研究获得成功的技术供大家分享。

第三篇包括 2 章。首先介绍了云爆威力测试(第 8 章),该项内容是云爆基础研究和云爆弹研制重要组成部分。内容包括:在实验室和靶场两种环境条件下开展云爆威力测试的实验装置和云爆过程各种参数测量方法等,构成了开展云爆基础研究和应用研究较系统的实验方法。最后介绍了云爆威力评价(第 9 章),包括:云爆威力评价指标、云爆毁伤评价准则以及云爆 TNT 当量等效计算方法等。提出了适合云爆威力以及毁伤的评价方法,并进一步基于云爆实验测试结果计算云爆等效 TNT 当量方法,为云爆弹研制和考核验收提供了必要的也是急需的手段。

本书的出版与有关单位支持和众多人员参与是分不开的。首先要感谢支持我们开展有关云雾爆轰基础研究和应用研究的单位,包括:中国人民解放军总装备部(含原国防科学技术工业委员会)、中国兵器工业集团公司、中国北方工业公司、中国兵器科学研究院、国家自然科学基金委员会、爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)等。

感谢参加我们有关云雾爆轰问题研究工作的所有人员。除其他几位作者外,先后参加研究工作的老师还有:刘庆明、王仲琦、郭彦懿、吴凤元、王云艳、林江等。作为学生参加工作的有:蒲加顺、肖绍清、孙晓明、熊祖钊、范喜生、王飞、赵永涛、李晓东、蒋丽、陈默、张

博、赵玉坤、裴益轩等。还要感谢时刻关心我们和支持我们的家人。本书的出版是上述人员共同努力的结果。

在本书编写过程中,我们几位作者构成了一个有机的整体。本书整体结构、章节内容甚至保密内容处理等都是共同研讨的结果。本人作为本书编写工作的组织者,确定了本书整体结构和具体内容,并执笔撰写了第1章。梁慧敏老师撰写了第一篇共3章,李建平老师撰写了第二篇共3章,张奇老师撰写了第三篇共2章。此外,梁慧敏老师还承担了本书多次修改和校对等工作。

最后,感谢爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)对本书出版的资助,感谢科学出版社和张析编辑给予的大力支持与帮助。

白春华

2012年7月21日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 云雾爆轰及其特点	1
1.2 云雾爆轰燃料发展综述	4
1.3 云雾爆轰控制发展综述	7
1.4 云雾爆轰应用	10
参考文献	13

第一篇 云雾爆轰燃料

第 2 章 固液混合云爆燃料及其特点	17
2.1 固液混合云爆燃料结构	17
2.1.1 云爆燃料分析	17
2.1.2 固液混合燃料结构发明	17
2.2 固液混合云爆燃料状态	19
2.2.1 组分作用力	19
2.2.2 物理稳定性	24
2.2.3 最佳固液比例	26
2.3 固液混合云爆燃料组分表面能	29
2.3.1 表面能影响因素	29
2.3.2 固液混合燃料的组分亲液性	31
2.3.3 表面能测定	32
2.4 固液混合燃料理化性能研究方法	36
2.4.1 爆轰参数计算方法	36
2.4.2 组分相容性研究方法	37
2.4.3 长贮性研究方法	41
2.4.4 发射安全性研究方法	44
2.5 固液混合云爆燃料制备与装药方法	46
2.5.1 制备方法	46
2.5.2 装药方法	48
2.5.3 装药质量检测方法	50
参考文献	52
第 3 章 两次引爆型云爆燃料	53
3.1 云爆燃料分散和爆轰机理	53

3.1.1	云爆燃料爆炸分散机理	53
3.1.2	云雾爆轰机理	58
3.2	液体云爆燃料	78
3.2.1	环氧烷烃类云爆燃料	79
3.2.2	碳氢类云爆燃料	81
3.3	固液混合云爆燃料配方设计	82
3.3.1	配方设计原则	82
3.3.2	组分选择	83
3.3.3	配方优化设计	86
3.4	B-II-1 云爆燃料主要性能	91
3.4.1	理化性能	91
3.4.2	分散性能	92
3.4.3	起爆性能	94
3.4.4	爆轰性能	94
	参考文献	95
第4章	一次引爆型云爆燃料	97
4.1	一次引爆型云爆燃料作用机理	97
4.1.1	分散爆轰机理	97
4.1.2	分散爆轰状态场	103
4.2	“什米尔-2”云爆燃料	106
4.2.1	燃料配方	106
4.2.2	燃料主要原材料指标	107
4.2.3	燃料主要性能	108
4.3	振动装填超压型固液混合云爆燃料	109
4.3.1	配方设计原则	109
4.3.2	配方优化设计	109
4.3.3	B-I-1 云爆燃料主要性能	111
4.4	压力装填超压型固液混合云爆燃料	112
4.4.1	配方设计原则	113
4.4.2	配方优化设计	113
4.4.3	B-I-2 云爆燃料主要性能	114
4.5	抗高过载型固液混合云爆燃料	116
4.5.1	配方设计原则	116
4.5.2	高过载高旋转条件下燃料安全性分析	116
4.5.3	配方优化设计	118
4.5.4	B-I-3 云爆燃料主要性能	119
4.6	温压型固液混合云爆燃料	120
4.6.1	配方设计原则	120

4.6.2 大装药量温压型云爆燃料的物理状态	121
4.6.3 配方优化设计	126
4.6.4 B-I-4 云爆燃料主要性能	132
参考文献	133

第二篇 云雾爆轰控制

第 5 章 两次引爆型云爆控制	137
5.1 两次引爆型云爆过程	137
5.1.1 战斗部系统构成	137
5.1.2 战斗部终点作用过程	137
5.2 定点强起爆方法	138
5.2.1 随机起爆方法分析	138
5.2.2 定点强起爆方法分析	140
5.2.3 二次引信运动轨迹控制	140
5.3 分散装药	145
5.3.1 云爆燃料分散“窜火”现象分析	145
5.3.2 “T”形分散装药结构	151
5.3.3 复合分散装药结构	155
5.4 子母式云爆战斗部	158
5.4.1 子弹壳体结构	158
5.4.2 子弹装药结构	160
5.4.3 子弹作用过程数值分析	162
5.5 整体式云爆战斗部	166
5.5.1 ОДАБ-500П 整体式战斗部结构	166
5.5.2 聚能开壳整体式战斗部结构	168
5.5.3 预制槽开壳整体式战斗部结构	169
5.5.4 整体式云爆战斗部数值分析	171
参考文献	179
第 6 章 一次引爆型云爆控制	180
6.1 已有一次引爆方法可行性分析	180
6.1.1 化学催化法	180
6.1.2 光化学起爆法	186
6.1.3 燃烧转爆轰法	187
6.1.4 高速湍动热喷流法	188
6.1.5 SWACER 机理及分析	188
6.2 基于分散爆轰法的云爆战斗部	189
6.2.1 战斗部系统构成	190
6.2.2 战斗部终点作用过程	190

6.3	分散起爆装药	191
6.3.1	分散起爆装药管	191
6.3.2	分散起爆装药结构	193
6.4	云爆榴弹弹体	195
6.4.1	头部引信云爆榴弹弹体	195
6.4.2	底部引信云爆榴弹弹体	196
6.4.3	云爆榴弹发射过程数值分析	197
6.4.4	云爆榴弹威力场数值分析	201
6.5	装药质心控制	205
6.5.1	云爆燃料密度的计算	205
6.5.2	固液混合态云爆燃料密度测试	207
6.5.3	装药体积调节器结构	208
	参考文献	209
第7章	子母式航空云爆弹技术	211
7.1	子母式航空云爆弹系统	211
7.1.1	系统组成	211
7.1.2	系统作用过程	216
7.2	母弹飞行稳定性	218
7.2.1	飞行稳定性试验	218
7.2.2	飞行稳定性数值分析	221
7.3	母弹尾部流场数值分析	225
7.3.1	母弹尾部流场数值分析模型	225
7.3.2	数值分析结果	227
7.4	母弹开舱可靠性	230
7.4.1	开伞过程分析	231
7.4.2	母弹开舱可靠性分析	233
7.5	子母弹落点散布	238
7.5.1	子弹飞行过程分析	238
7.5.2	子弹落点散布数值分析	243
	参考文献	245

第三篇 云雾爆轰威力评价

第8章	云爆威力测试	249
8.1	云爆试验系统	249
8.1.1	实验室云爆试验系统	249
8.1.2	靶场云爆试验系统	254
8.2	云爆威力测试	256
8.2.1	爆轰过程测试	256

8.2.2 超压测试	258
8.2.3 温度测试	263
8.2.4 地震波测试	270
参考文献	271
第9章 云爆威力评价	273
9.1 云爆威力评价方法	273
9.1.1 爆轰潜能法	273
9.1.2 爆轰能量法	273
9.1.3 冲击波能量法	274
9.1.4 冲击波参数法	274
9.1.5 有效作用区面积法	275
9.1.6 等效靶方法	275
9.2 云爆毁伤评价准则	276
9.2.1 冲击波毁伤评价准则	276
9.2.2 热辐射毁伤评价准则	281
9.2.3 振动毁伤评价准则	283
9.3 云爆 TNT 当量计算	288
9.3.1 计算方法	288
9.3.2 试验结果评定	290
参考文献	290

彩图

第 1 章 绪 论

1.1 云雾爆轰及其特点

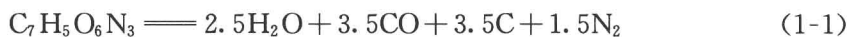
本书中“云雾爆轰”含义是,本身不具备爆轰条件的燃料在爆炸等动载荷作用下与空气混合形成满足爆轰条件的燃料空气炸药云雾,并通过适当方法控制时间、位置和能量等条件起爆燃料空气炸药云雾并实现爆轰。云雾爆轰是由在当前常规武器装备中占有特殊地位的云爆武器(通常称为云爆弹)发展形成的一门新兴科学技术;反过来,云雾爆轰也是推动云爆弹发展的理论和技术基础。云雾爆轰包含的科学问题主要有:形成高能量燃料空气炸药云雾的云雾爆轰燃料理论与技术(简称为云雾爆轰燃料),实现燃料空气炸药云雾可靠爆轰的云雾爆轰控制理论与技术(简称为云雾爆轰控制),以及科学评价云爆弹毁伤能力的云雾爆轰威力评价方法(简称为云雾爆轰威力评价)等。

云雾爆轰过程是云爆弹终点作用过程的完整体现。与常规弹药终点的高能炸药爆轰相比,云爆弹的云雾爆轰具有以下显著特点^[1]。

一、装药效率高

由于初始装填的燃料自身不具备爆轰条件,其爆轰反应的氧化剂来源于当地空气中的氧气,因此云雾爆轰反应产生的能量可达数倍 TNT 当量。下面以 TNT 高能炸药、液体环氧丙烷燃料和固体铝粉燃料为例分析云雾爆轰能量。

TNT 炸药爆轰反应方程式为



式中, TNT 炸药爆轰反应的氧化剂来源于 TNT 炸药本身,其质量占 TNT 总质量的 42.3%,最终产生爆热为 1.09 kcal^①/g。

环氧丙烷燃料云雾爆轰反应方程式为



式中,环氧丙烷燃料云雾爆轰反应的氧化剂来源于空气中的氧气,其质量占总反应物质质量的 71.3%,爆轰反应产生的爆热为 5.91 kcal/g,爆轰等效 TNT 当量的 5.42 倍。

铝粉燃料云雾爆轰反应方程式为



式中,铝粉燃料云雾爆轰反应的氧化剂同样来源于空气中的氧气,其质量占总反应物质质量的 47.1%,爆轰反应产生的爆热为 7.2 kcal/g,爆轰等效 TNT 当量的 6.6 倍。

^① cal 为非法定单位,1 cal=4.184 J。

二、爆轰体积大

云雾爆轰是通过炸药爆炸载荷等作用使燃料在空气中分散,形成燃料空气炸药云雾,在云雾达到爆轰浓度的条件下起爆,形成大范围的爆轰区。一般燃料装填密度为 10^0 g/cm^3 量级,云雾爆轰燃料浓度为 10^{-4} g/cm^3 量级,即燃料空气炸药云雾爆轰体积是燃料装填体积的 10^4 倍量级。而高能炸药爆轰发生在装药内部,爆轰体积与装药体积相当。

三、压力衰减缓慢且冲量大

云雾爆轰过程中,爆轰区内部产生爆轰波,爆轰区外部产生冲击波,它们共同构成云雾爆轰压力作用区,超压载荷是云爆弹产生的最主要的毁伤因素。云雾爆轰产生的峰值超压随距离衰减缓慢,且云雾爆轰在每一点产生的超压随时间衰减缓慢,具有较大的冲量。无论是峰值超压随距离衰减,还是空间点超压随时间衰减,云雾爆轰与高能炸药爆轰具有明显的不同之处。图 1-1(a)为云雾爆轰与高能炸药爆轰的峰值超压随距离衰减曲线的比较,图 1-1(b)为云雾爆轰与高能炸药爆轰的空间点超压随时间衰减曲线的比较。

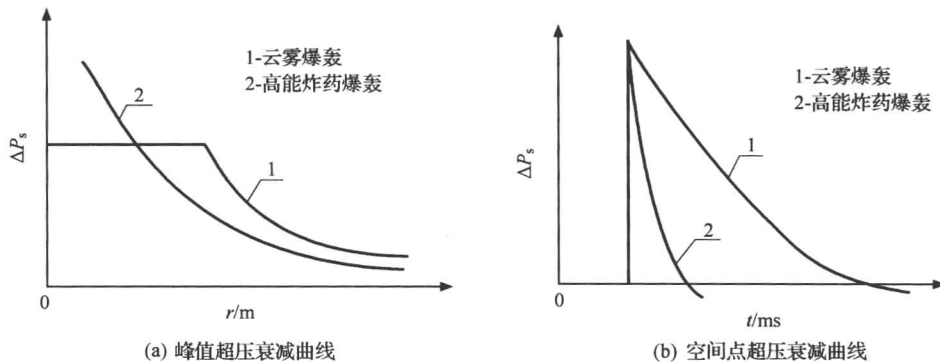


图 1-1 云雾爆轰与高能炸药爆轰的超压衰减曲线比较示意图

四、毁伤因素多

云雾爆轰除产生超压毁伤因素外,还会产生热辐射、缺氧、地震波等多种毁伤因素。在云雾爆轰产生大体积爆轰区的同时还会产生大体积高温火球,高温火球的温度高达 $10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ 量级,持续时间为 10^2 ms 量级。由于云雾爆轰反应会消耗空气中的氧气,在云雾爆轰区内会产生缺氧,缺氧时间取决于周围空气的扩散过程。云雾爆轰为大体积爆轰过程,在地面上作用时会产生地震波效应,地震波沿地表和地下向外传播。

云雾爆轰的特点决定了云爆弹的作战使用方法。云爆弹终点作用的核心特点是产生大体积爆轰、超压衰减缓慢以及产生大体积高温火球等目标毁伤因素。只有充分发挥其优势和特点,才能实现对战场目标的高效毁伤。云爆弹能够产生高效毁伤的目标包括以下 3 类。

一、复杂环境和隐蔽条件下的目标

云爆弹终点作用过程首先是燃料在空气中扩散,形成大体积燃料空气炸药云雾,然后将其引爆产生大体积云雾爆轰区。由于扩散能够使燃料进入复杂环境和隐蔽防护的目标内部或周围,形成燃料空气炸药云雾,云雾爆轰后能够对目标产生爆轰直接作用,从而达到对目标的高效毁伤效果。而高能炸药弹药爆轰发生在战斗部内部,向外传播的冲击波及破片是以战斗部为中心向外运动的,对直接暴露的目标能够产生有效毁伤,对隐蔽或遮挡的目标不能产生直接作用,难以取得有效的毁伤效果。因此,云爆弹能够产生高效毁伤效果的目标包括:拥有战壕、工事、掩体等隐蔽设施的人员和装备;隐蔽在山洞、山区、丛林中的人员和装备;港口、机场、建筑群等物质密集区的人员和装备等。图 1-2 为云爆弹有效毁伤隐蔽目标的示意图。

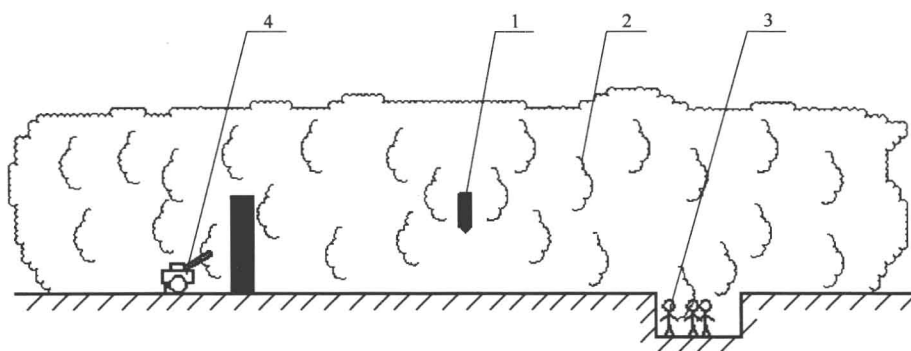


图 1-2 云爆弹有效毁伤隐蔽目标的示意图

1-云爆战斗部;2-燃料空气炸药云雾;3-战壕中人员;4-挡墙后装备

二、暴露的面软目标

面软目标是指分散布置的对低超压和大冲量敏感的目标。由于云爆弹终点作用能够产生低超压、大冲量的超压场,其最大峰值压力在 MPa 量级,冲量在 MPa·ms 量级。因此,云爆弹适合打击的目标有:停机坪飞机、无装甲集群车辆和通信指挥中心等。

三、易燃易爆物质

由于云爆弹终点作用能够产生大体积高温火球,且温度高达 10^3 ℃ 量级,持续时间长达 10^2 ms 量级,能够达到部分易燃易爆物质的引燃引爆条件,产生引燃引爆,并能进一步引起系统燃烧或系统爆炸。这类目标存在的场所有:化工厂、燃料库和弹药库等。

对缺氧导致人员窒息效应的分析如下。云爆弹爆轰反应区内部确实会出现无氧或缺氧的现象,如果人员暴露于其内部就能够产生窒息效应。但需要指出的是,对于暴露人员来说,他们会同时受到爆轰产生的超压作用和窒息作用。而超压对人员的毁伤条件是 10^{-1} MPa 即可致死,而云雾爆轰区内的超压达到 10^0 MPa 量级,远大于人员毁伤条件,且作用时间在 ms 量级。因此,暴露在爆轰区内的人员首先会因超压作用致死,而来不及受

到缺氧产生的窒息毁伤。

1.2 云雾爆轰燃料发展综述

云雾爆轰燃料简称为云爆燃料,是随云爆弹发展起来的一种特殊燃料,它有别于通常意义上的民用工业和日常生活中使用的燃料,也不同于常规武器装填的高能炸药。但从燃料定义上来说,这类燃料也具有与通常燃料相同的基本特征,其本身不含氧化剂,与外界空气混合后即可发生氧化反应放出能量,实现对外界做功^[2]。但云爆燃料与外界空气混合后的化学反应是爆轰反应,爆轰即物质能量释放的极限状态,以其最大的反应速率释放能量,产生压力、温度等状态突变,实现对爆轰区域内以及爆轰区域外目标的有效毁伤。从武器装药定义上来说,这类燃料又满足武器装药定义,即装填在武器战斗部中并为武器毁伤目标提供能量。但其在武器作用过程中与常规高能炸药装药具有本质不同,常规高能炸药装药本身能够达到爆轰化学反应的条件,自身带有氧化剂,爆轰化学反应发生在战斗部内部,爆轰状态与外界条件无关。而云爆弹装填的燃料本身不具备发生爆轰反应的条件,必须将其与当地空气混合形成燃料空气炸药云雾,再将其引爆才能发生爆轰反应。

云爆燃料研究是云爆弹研究的重要组成部分。云爆弹包括两种类型,即两次引爆型和一次引爆型。云爆弹是从两次引爆型发展起来的,同样云爆燃料研究也是从两次引爆型燃料研究开始的。到目前为止,云爆燃料研究经历了半个多世纪的发展,呈现了不断失败、不断进步的发展过程^[3~5]。最早的云爆燃料选择的是易分散和易爆轰的气体燃料,如丙烷、丙二烯等^[6]。气体燃料以分子形式存在,通过在空气中自由扩散即可满足爆轰所要求的物理状态,且气体燃料空气混合物具有较小的起爆能量,易于起爆和爆轰传播。从实现爆轰的角度来说,气体燃料是一种理想的云爆燃料。但从武器装药要求上来说,气体燃料具有明显不足。武器装药的基本要求是能量大,能量是由物质本身的能量特性和装药量两方面决定的。即使气体燃料本身的能量特性能够满足武器需要,但最大问题是气体燃料的装填密度太低,常温常压下气体燃料的密度为 10^{-3} g/cm³量级,装填量太少,战斗部装药总能量远远不能满足武器需要。若通过加压提高气体燃料装填密度,会给战斗部强度提出特殊要求,致使战斗部无法满足分散燃料等基本要求。因此,气体燃料很难成为云爆弹产品的装药,世界各国也没有将气体燃料作为云爆弹武器装备的主要燃料。

为了克服气体燃料装填密度低的问题,人们首先选择液体燃料作为云爆弹装填燃料^[7~9]。美国选择了环氧烃类燃料作为云爆弹装填燃料^[10],他们首先选择的是环氧乙烷液体燃料,其装填密度为 0.87 g/cm³,约为丙烷气体燃料的 10^3 倍。云爆弹装填燃料除具有装填密度大的特点外,还必须能够形成易于实现爆轰的燃料空气炸药云雾,即在空气中具有良好的雾化性能,因此选择燃料的另一个重要指标是沸点,环氧乙烷燃料的常压沸点是 10.5°C 。美国在进行了充分的研究工作之后,将环氧乙烷液体燃料应用到了武器装备中^[11,12]。其中,CBU-55B航空云爆弹就是应用的典型产品,成为世界上第一个云爆弹产品,并在越南战争中首次投入战场使用,产生了特殊的目标毁伤效果,同时对常规武器装备的发展产生了重大影响。随着人们对云爆弹需求的增长,对云爆弹装填燃料提出了更高要求。环氧乙烷燃料基本的威力能够满足要求,但发现其在高温长贮过程中出现了聚

合现象,易挥发,且具有较大的毒性^[13]。在这种情况下,美国开始了寻找代替环氧乙烷的新燃料的研究工作^[14]。研究工作仍局限在环氧烃类燃料,最终确定环氧丙烷燃料作为新一代云爆燃料。环氧丙烷与环氧乙烷相比,装填密度和分散爆轰性能相当,其装填密度为 0.83 g/cm^3 ,常压下沸点为 $33.9\text{ }^\circ\text{C}$,但物理和化学稳定性及毒性都明显优于环氧乙烷燃料。美国基于环氧丙烷液体燃料开发了一批云爆弹武器型号用于装备部队,并在1991年海湾战争中大量投入使用,取得了很好的战术和战略效果。目前环氧丙烷液体燃料仍是美国装备云爆弹型号的主体燃料。

苏联的两次引爆型云爆弹燃料研究走了自己的发展道路。苏联结合自己的国情选择液体碳氢化合物作为云爆燃料^[15],主要是石化产品或石化副产品,如戊二烯(C_5H_8)等。1,3-戊二烯燃料在常温常压下的装填密度为 0.68 g/cm^3 ,比美国环氧丙烷燃料低,常压下的沸点为 $42.3\text{ }^\circ\text{C}$,比美国环氧丙烷燃料高。苏联云爆燃料的理化性能与美国的环氧丙烷相当,但这种燃料符合他们自己的国情,来源广泛,价格低廉。苏联基于液体云爆燃料研究成果开发了两次引爆型云爆弹装备型号,其中“ОДАВ-500П 航空云爆弹”是典型产品^[16],据报道该产品在苏联阿富汗战争和俄罗斯车臣战争中都投入了使用,取得了预期的效果。

随着云爆弹在战争中作用的突现,世界军事大国更加重视云爆弹装备的发展,将提高云爆弹威力提到了重要位置,给云爆燃料研究提出了更高要求^[17]。美国和俄罗斯等国家先后开展了含高热值金属粉的云爆燃料的研究工作。研究工作采取两条技术路线:一是在原有的液体燃料中添加金属粉,形成液固混合燃料,以达到提高云爆燃料能量的目的;二是开展全固型云爆燃料的研究工作,开发一种全新的云爆燃料,目的是大幅度提高云爆弹装填燃料能量。

在液固混合燃料研究方面,美国首先开展了在环氧丙烷液体燃料中加入高密度、高热值、低耗氧铝粉等的研究工作^[18],在云爆弹威力性能上取得了明显效果。试验结果表明,在环氧丙烷液体燃料中加入质量分数为30%的铝粉,这种燃料空气炸药的云雾爆轰峰值超压从原来的 2.3 MPa 提高到 3.0 MPa ,提高近30%。但其出现了武器应用性能的问题,即状态稳定性问题。加入液体环氧丙烷中的铝粉,由于存在较大的密度差,出现了铝粉沉降现象,不均匀状态的燃料对燃料的分散和起爆都会产生严重影响。为了解决铝粉沉降问题,美国首先开展了增稠液体以提高液体悬浮能力的研究工作^[19],选择MOA(失水山梨醇单油酸酯)和Span-80(脂肪醇聚氧乙烯醚)为增稠剂,使铝粉与环氧丙烷形成悬浮乳状液,然后采用胶凝化技术^[20],加入多元醇和胶凝剂(二氧化硅、炭黑、辛酸铝等)以胶凝环氧丙烷与铝粉混合物^[21,22],得到了状态稳定的凝胶状液固混合燃料。但是,由于增稠和胶凝使液体黏度增大,在炸药爆炸载荷驱动下燃料在空气中不易破碎和雾化,达不到稳定起爆和爆轰的条件,最终导致云爆弹终点爆轰率下降。该项研究工作未取得预期成果,液固混合燃料没有研制成功,当然没有形成武器装备。

全固型燃料研究方面,美国、苏联等选择了铝粉、镁粉等金属粉,其热值高、密度大、耗氧较低,更重要的是这些组分具有较好的武器化应用性能,包括:来源广泛、价格低廉及对人员和环境危害较小。美国科学家首先研究了微米片装铝粉在自由场条件下的起爆和爆轰性能,结果表明^[23]:微米片装铝粉空气混合物在自由场中爆轰峰值超压能达到 5.0

MPa,比环氧丙烷等液体燃料提高一倍以上,说明高热值金属粉具有非常明显的威力优势,但其临界起爆药量为 2.27 kg C4 炸药。因此,铝粉等金属粉作为云爆燃料存在两方面问题:一是金属粉自然状态下密度低,如铝粉自然状态密度约为 0.5 g/cm³,装入战斗部中状态不稳定,在勤务处理条件下密度会发生改变,无法满足武器化要求。若采用加压工艺提高装填密度,会增加金属粉颗粒间结合能,在炸药爆炸载荷作用下会产生烧结结块,无法形成稳定起爆和爆轰传播的燃料空气炸药云雾,最终导致云爆弹终点爆轰率低。二是金属粉空气混合物临界起爆药量过大,武器难以满足。微米片装铝粉空气混合物临界起爆药量大于 2.27 kg C4 炸药,在武器中应用时为提高作用可靠性,应选择一倍以上的起爆系数,即云爆弹云雾起爆药量至少达到 4.54 kg C4 炸药,相当于 5 kg 以上的 TNT 炸药,这在大多数武器中都难以满足。正是因为上述两个问题没有解决,至今全固体组分云爆燃料仍未研制成功。长期以来,两次引爆型云爆燃料研究是否成功和能否推广使用取决于其综合性能好坏,其中包括燃料本身具有的威力性能(如装填密度、云雾爆轰参数等)和燃料空气炸药云雾的形成性能(如液体的破碎雾化、固体颗粒表面结合能等),还包括武器化应用性能(如安全性、长储性及原材料来源等)。具备先进性能的两点引爆型云爆燃料是永恒的研究课题。典型的两次引爆型云爆燃料的分散和爆轰过程如图 1-3 所示。

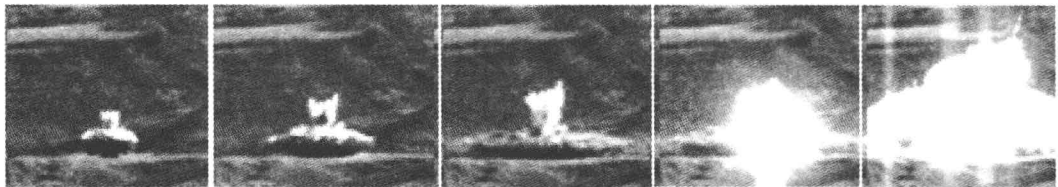


图 1-3 两次引爆型云爆燃料的分散和爆轰过程

一次引爆型云爆弹装填燃料要以满足一次引爆型云爆弹终点边分散边爆轰过程为前提,再综合考虑武器化应用性能^[24]。一次引爆型云爆燃料与两次引爆型云爆燃料具有相同之处,也具有明显的不同之处。相同之处在于,两种云爆燃料均需具有高威力性能,同时必须具有较好的分散性能,空气必须参与爆轰反应;不同之处在于,由于在燃料分散的初始阶段空气进入很少,一次引爆型燃料自身要带有一定量的氧化剂,以满足初期云雾爆轰使用。因此,一次引爆型云爆燃料要具有实现边分散边爆轰的感度梯度、氧含量梯度等性能。图 1-4 为一次引爆型云爆燃料的边分散边爆轰过程。

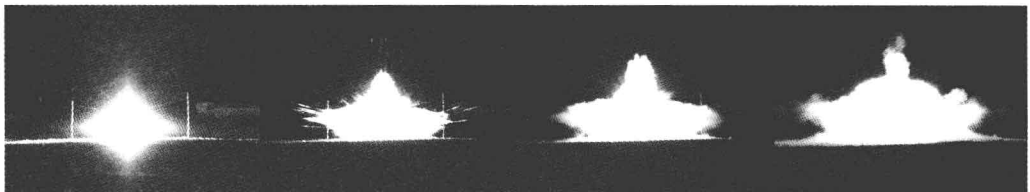


图 1-4 一次引爆型云爆燃料的边分散边爆轰过程