



国防特色教材·兵器科学与技术

毁伤理论与技术

HUI SHANG LI LUN YU JI SHU

王凤英 刘天生 编著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·兵器科学与技术

毁伤理论与技术

王凤英 刘天生 编著

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书内容涵盖弹药对目标的毁伤理论与技术,理论联系实际,现代联系未来。重点突出了空中目标的毁伤理论和技术,系统地介绍了弹药毁伤评价、目标毁伤评价(包括空中目标、水下目标、地下目标和地上目标)以及弹药毁伤的相似理论和计算机模拟新技术等内容。

本书可作为高等院校国防院校相关专业本科生、研究生教材,也可供从事军工科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

毁伤理论与技术/王凤英,刘天生编著.——北京:北京理工大学出版社,2009.10
国防特色教材.兵器科学与技术
ISBN 978-7-5640-2513-7

I. 毁… II. ①王…②刘… III. 弹药-战术技术性能试验-高等学校-教材
IV. TJ410.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 123335 号

毁伤理论与技术

王凤英 刘天生 编著

责任编辑 刘志实

*

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街 5 号(100081) 发行部电话:010-68944990 传真:010-68944450

<http://www.bitpress.com.cn>

北京地质印刷厂印刷 全国各地新华书店经销

*

开本:787 毫米×960 毫米 1/16 印张:22.75 字数:462 千字

2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷 印数:1—3000 册

ISBN 978-7-5640-2513-7 定价:56.00 元

序

军事需求是兵器发展的必然与动力，人才培养、科技进步和工业现代化是兵器发展的支撑。兵器最终目的是对目标实施最佳的毁伤效能，历来兵器都遵循作战对目标的有效毁伤，以此实现最大毁伤的发展规律。毁伤分为矛盾的两个方面，弹药为毁伤之矛，目标为毁伤之盾，而矛盾的双方在斗争中不断发展，全面突显实力。在科技发达国家，正是以这对矛盾发展为主线，促进了教育、科技、工业的进步。美、俄及欧洲等军事强国无不如此。进入 21 世纪后，战争的需求有了新的发展，目标的范畴有了大的拓展，以往的矛（例如导弹）已转变为重要的盾，各种远距离、高精度、大威力毁伤性武器成为更重要的目标。

毁伤是通过流体或固体能量的作用，使目标丧失正常的功能。毁伤理论与技术主要研究弹药对目标的作用机制及技术、目标的易损性及评估理论，弹药作战的最终目的是实现对目标的毁伤，使其失去战斗能力，因此，毁伤理论与技术不仅是武器系统、防护系统设计的基础，而且也是指导战役战术使用武器的科学依据。

毁伤理论与技术与弹药和目标的发展密切相关。既受其推动，又促其发展。自 1829 年法国工程师 J.V.Poncelet 关于炮弹侵彻土、石介质的实验研究起，人们广泛地研究了实心弹丸对船只、地面工事以及钢甲的侵彻和击毁效应，研究了弹丸对间隔装甲板的侵彻。到 20 世纪初期，由于飞机在军事上使用，人们又开展了对飞机的攻击和飞机易损性方面的研究。化学武器将毁伤从基于爆炸、碰撞和侵彻等机械损伤发展到化学损伤，并启发人们进一步研究新的毁伤手段，探索新的毁伤机制。“二战”期间，由于聚能装药的采用，扩大了爆炸技术的分析和试验研究。近十几年来，随着弹药精确化技术的发展及各种军事目标易损性的不断改善，弹药对目标毁伤的能力也在大幅度提高，并研究发展了多种定向能和软杀伤武器，如电磁武器、激光束、粒子束武器、失能弹药等，从而大大地拓展了武器毁伤的内涵。

毁伤理论与技术作为武器研究发展的基础，世界各国对其都很重视，并投入大量的人力、物力加以研究。仅在美国就有数十个实验室、大学、研究所和武器承包商从事这方面的研究工作。美国陆军研究所有 2/5 的人员在专门从事武器毁伤学的研究。美国国防部认为，要评估一个国家在未来冲突中的态势，首先要能精确地评估各种武器的杀伤力和易损性的能力（L/V）。而武器杀伤力和易损性分析正是武器毁伤学的研究范畴。

多年来，诸如美国这样的军事大国，一直在比较全面地进行武器的终点效应和目标易损性的研究，在理论和方法上都较成熟。到目前为止，美国研究了战场上所有军事目标的易损特性、武器的杀伤力和毁伤机制，积累了丰富的实验数据，对各种目标毁伤模式研究较透彻，为爆炸、侵彻、杀伤等毁伤机制建立了较完善的基础理论，并发展了如 DYNA、AOTODYNA 等大型的数值分析程序和武器对抗仿真程序。在研究手段上已从实验研究发展到实验与理论

建模、数值模拟相结合。对典型的军事目标一般都建有相关毁伤准则。在近几年中，美国仍一如既往地重视武器毁伤学的研究，一方面在深化研究传统的毁伤问题；另一方面则致力于研究发展新的毁伤机制，例如激光对目标的破坏机制、高功率微波对目标的毁伤机制等。在欧美的其他发达国家，毁伤理论与技术的研究同样备受重视。在法国马赫研究所，五个研究部门中的三个部门在研究有关毁伤理论与技术的课题。以色列、俄罗斯都有专门从事武器毁伤研究的专业科技队伍。其中俄罗斯科学院西伯利分院在目标材料破坏机制方面的研究处在世界领先水平。

总之，毁伤理论与技术作为一门武器基础科学，不仅是弹药技术和目标防护技术的基础，也是特性评定的基础。毁伤理论与技术对武器、装备的发展和使用均有重要的指导意义。



前 言

我国是世界上最大的发展中国家，政治、军事、经济、科学与技术、工业与交通正在进一步的发展，将为全球及人类的和谐发展而不懈地努力。当今，世界的安全环境十分复杂，占全球财富之多数、人口之少数之由大资本家控制的经济、军事强国，仍为掠夺而致力于军备竞赛，而且不断地刮起政治、经济等旋风，不断地挑起跨区域化的局部战争，给全世界局部区域内的人民带来了巨大的灾难。分析我国未来可能面临的战争模式，从威胁方向、地域、作战类型和各类目标出现的频率，发展我国的毁伤与反毁伤理论与技术，对于我国兵器的发展具有重要的历史意义和现实意义。为确保未来我国的安全与发展，人民生活和谐与幸福，增强本科生、研究生及科技人员的国防知识和能力，根据国防科工委“十一五”教材编写规划，特编写了该书。

本书理论性较强，应用了流体力学、固体力学、应力波基础、爆炸力学等理论。并结合现代战争的发展，介绍了目标易损性分析与评价方法，以及相似理论、计算机模拟仿真等技术。全书共分10章，第1章毁伤理论基础，主要介绍了爆炸理论、破片、动能、聚能、碎甲、燃烧、软杀伤等作用原理；第2章重点阐述了爆炸载荷作用下构件的响应及工程计算问题；第3、第4、第5章分别讲述了破片、长杆形动能弹、聚能效应等相关理论；第6、第7章介绍了毁伤评估理论及目标易损性分析方法；第8章讨论了特种战斗部毁伤导弹的评估原理；第9章介绍了毁伤相似理论；第10章结合实例探讨了战斗部的毁伤数值模拟。

本书由王凤英教授负责编著，刘天生、常双君、李如江、张晋红、高永宏、周鹏等参编。其中第1、第6章由王凤英完成，第2、第8章由刘天生完成，第3章由常双君完成，第4章由张晋红完成，第5章由周鹏完成，第7章由高永宏完成，第9、第10章由李如江完成。全书由刘天生统稿，张晋红、李如江等负责编辑。

本书由中国科技大学沈兆武教授和中北大学肖忠良教授审阅，并提出了许多宝贵意见，编者谨向他们表示衷心感谢。另外，本书收集了国内外相关的文献资料，在此向所有引用文献的作者表示感谢。

由于编者水平有限，难免有错误和不妥之处，敬请读者批评和指正。

编 者

目 录

第 1 章 毁伤理论基础.....	1
1.1 爆炸理论.....	1
1.1.1 空气中爆炸.....	1
1.1.2 水中爆炸.....	4
1.1.3 岩土中侵彻作用.....	6
1.1.4 土中爆炸的基本现象.....	8
1.2 破片作用原理.....	10
1.2.1 破片对目标的贯穿作用.....	10
1.2.2 破片的引燃作用.....	13
1.2.3 破片的引爆作用.....	13
1.3 动能作用原理.....	14
1.3.1 普通穿甲弹的穿甲作用.....	15
1.3.2 杆式穿甲弹的穿甲作用.....	16
1.4 聚能作用原理.....	17
1.4.1 聚能效应.....	17
1.4.2 聚能侵彻理论.....	19
1.5 碎甲作用原理.....	28
1.6 燃烧作用原理.....	30
1.7 软杀伤作用原理.....	31
1.7.1 对人员的软杀伤.....	31
1.7.2 对武器装备的毁伤.....	32
1.8 综合毁伤.....	37
1.8.1 杀、爆、燃综合毁伤.....	37
1.8.2 破片与冲击波的综合毁伤.....	38
1.8.3 随进毁伤.....	38
1.8.4 燃烧—爆炸综合毁伤.....	39
思考题.....	39

第2章 爆炸载荷下目标构件的工程计算	40
2.1 空气爆炸载荷下构件的响应	42
2.1.1 空中爆炸冲击波加载在构件上的载荷	42
2.1.2 梁在空中爆炸冲击波作用下的弹性变形	45
2.2 水下爆炸载荷下构件的反应	54
2.3 炸药接触爆炸时构件的反应	58
2.3.1 炸药接触爆炸载荷	58
2.3.2 爆炸驱动飞板的计算	61
2.3.3 管球壳内部爆炸驱动计算	66
2.4 高速撞击载荷	73
思考题	74
第3章 破片形成理论与技术	75
3.1 自然破片形成的弹塑性理论	75
3.1.1 壳体膨胀模型	78
3.1.2 破裂时壳体的极限半径	83
3.1.3 破裂和裂纹的动态成长	85
3.1.4 破片平均质量计算	95
3.2 破片控制技术	97
3.2.1 刻槽方法分析	98
3.2.2 战斗部栅格模型	100
3.3 预制破片模型及计算	106
3.3.1 形状均匀的破裂模型	107
3.3.2 非均匀栅格破裂模型	111
3.3.3 内衬破裂模型	115
思考题	116
第4章 长杆形动能弹对目标的毁伤与作用	118
4.1 长杆形动能穿甲弹毁伤过程	118
4.2 长杆形动能弹对靶板的毁伤作用	120
4.2.1 塑性杆体对半无限刚性靶的撞击变形模型	120
4.2.2 塑性杆体对半无限可变形靶的撞击模型	128

4.2.3	长杆形动能穿甲弹垂直侵彻半无限靶的简化模型	132
4.2.4	长杆形动能弹斜侵彻半无限靶的简化计算	136
4.3	长杆形动能穿甲弹对中厚靶板的穿透	142
4.3.1	长杆形动能穿甲弹垂直冲塞穿透靶板	142
4.3.2	极限穿透速度的经验公式	145
4.3.3	斜穿透的弹杆剩余速度及长度	148
4.3.4	长杆弹斜侵彻有限厚钢甲分析模型	153
4.4	长杆形动能弹侵彻多层靶板	159
4.4.1	双层间隔靶抗长杆形动能弹穿透试验研究	159
4.4.2	长杆形动能弹对三层间隔靶的侵彻	164
	思考题	167
第 5 章	毁伤导弹聚能技术	168
5.1	聚能装药	168
5.2	射流特性	170
5.2.1	一维稳态射流模型	170
5.2.2	射流断裂模型	174
5.3	定向能毁伤技术	179
5.3.1	线性聚能装药	182
5.3.2	多射流聚能装药	184
5.4	爆炸成型弹丸 (EFP)	186
5.4.1	EFP 形成的理论计算	187
5.4.2	P-装药战斗部	188
5.4.3	P-装药模型	191
	思考题	193
第 6 章	毁伤评估理论	194
6.1	毁伤作用场	194
6.1.1	基本术语	194
6.1.2	毁伤能力函数 $p(f_c)$	194
6.1.3	以向径 r 为自变量的毁伤能力函数 $P(r)$	195
6.1.4	毁伤作用场	195
6.2	常用的毁伤分布	196

6.2.1	对标准分布形态的改进	197
6.2.2	余正态分布	198
6.2.3	镜像威布尔 (Weibull) 分布	198
6.2.4	非点对称场的概率分布	199
6.3	目标易损性评估方法	199
6.3.1	易损性评价步骤	200
6.3.2	AHP-模糊综合评价法	201
6.4	弹药威力及其度量指标	209
6.4.1	弹药威力的概率指标	210
6.4.2	毁伤 (杀伤) 面积	210
6.4.3	组分毁伤面积	211
6.4.4	破片杀伤分毁伤面积	212
6.4.5	破片穿甲分毁伤面积	213
6.4.6	爆炸分毁伤面积	215
6.4.7	应用实例	218
	思考题	221
第 7 章	目标易损性分析	222
7.1	人员目标	222
7.1.1	丧失战斗力的判据	222
7.1.2	破片、枪弹	223
7.1.3	冲击波	225
7.1.4	火焰和热辐射	228
7.2	地面车辆	229
7.2.1	装甲车辆	229
7.2.2	非装甲车辆	234
7.3	地面和地下建筑物	235
7.3.1	地面建筑物	235
7.3.2	地下建筑物	236
7.3.3	常规炸弹破坏力分析	237
7.4	空中目标	240
7.4.1	飞机目标的易损性及影响因素	240
7.4.2	破坏等级及其评定	242

7.4.3 飞机类型及所处的场合	242
7.4.4 飞机终点弹道试验数据分析	244
7.4.5 飞机易损性预测	248
7.5 水下目标	249
思考题	253
第 8 章 特种战斗部毁伤导弹评估	254
8.1 系统毁伤概率	254
8.2 易损区域计算	255
8.3 动能杆毁伤战斗部的分布密度	259
8.4 战斗部破片密度	266
8.4.1 杀爆战斗部破片密度	266
8.4.2 万向战斗部的破片密度	267
8.5 破片毁伤概率	270
8.6 破片的均匀性与随机分布	272
8.7 MD 偏差	276
8.8 直接命中概率的计算	278
思考题	281
第 9 章 毁伤相似理论	282
9.1 相似律理论基础	282
9.1.1 量纲定义和常见物理量的量纲	283
9.1.2 Buckingham Π 定理	284
9.1.3 相似律	286
9.2 空气中爆炸 $p-t$ 相似律	287
9.3 水中爆炸 $p-t$ 相似律	289
9.4 自由场中水下爆炸波的几何相似律	291
9.5 岩土中的爆炸相似律	294
9.5.1 岩土中的爆炸相似律基础	294
9.5.2 岩土中爆炸相似律的应用	300
9.6 聚能效应相似理论	303
9.6.1 聚能射流形成过程的相似参数分析	304
9.6.2 射流侵彻过程的相似参数分析	305

9.6.3 模拟试验.....	307
思考题	310
第 10 章 战斗部毁伤数值模拟.....	311
10.1 有限差分法.....	314
10.1.1 流体的流动.....	316
10.1.2 Eulerian 和 Lagrangeian 描述	318
10.1.3 差分形式的守恒方程.....	319
10.1.4 ALE 方法.....	325
10.2 有限元法.....	326
10.2.1 控制方程组和空间有限元离散.....	327
10.2.2 沙漏黏性与人工体积黏性控制.....	330
10.2.3 应力计算.....	332
10.2.4 时间积分和时步长控制.....	333
10.3 状态方程和本构关系.....	335
10.3.1 状态方程.....	335
10.3.2 本构关系.....	338
10.4 实例分析.....	340
思考题	347
参考文献	348

第1章 毁伤理论基础

弹药对目标的毁伤一般是通过其在弹道终点处与目标发生的撞击、爆炸等作用，将自身的动能或爆炸能或其产生的作用元（破片、射流等）对目标进行机械的、化学的、热力效应的破坏，使之暂时或永久地局部或全部丧失其正常功能，失去作战能力。影响目标毁伤程度的主要因素是目标自身的易损性和弹药的威力——使目标失去战斗功能的能力。

1.1 爆炸理论

弹丸或战斗部爆炸对目标产生的破坏作用统称为弹丸的爆炸效应。装药爆炸时，产生强大的冲击波向四周运动，将以很高的压力作用在障碍物上，产生的冲量和超压，使目标遭受不同程度的破坏。

1.1.1 空气中爆炸

1. 空气冲击波

装药在空气中爆炸产生的高温、高压爆轰产物急剧膨胀，把周围空气从原来位置迅速排挤出去，形成一压缩空气层。这个以超音速运动、状态参数有突跃变化的压缩空气层即为空气冲击波，其前沿称波阵面。一方面，继续膨胀的爆轰产物推动空气冲击波波阵面使其不断加速向外运动（其运动速度大于当地音速）；另一方面因为空间增大和对外做功能量损失，爆轰产物的压力降低且膨胀速度减小。当爆轰产物压力降到空气初始状态压力时，空气冲击波与爆轰产物发生了分离，此时空气冲击波完全形成。爆轰产物因惯性继续膨胀，直至其压力低于周围大气压力，在空气冲击波后部产生一个低于周围气压的稀疏区。冲击波上空气质点的运动速度与冲击波的传播方向一致，速度的大小由其压力决定。波阵面上质点速度最大，而后逐渐减小，在波尾处质点速度为零。由于波阵面上质点速度前大后小，使得空气冲击波在传播过程中其波长不断增大，且其波后总有一个负压区。

空气冲击波在传播过程中，波阵面上的压力等参量迅速下降，最后就衰减成声波。

2. 空气冲击波的基本方程

空气冲击波波阵面上状态参量，压力 p 、密度 ρ 、温度 T 和质点速度 u 都发生了突跃，联系冲击波波阵面两侧各参量关系的方程为

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{(\gamma+1)p_1 + (\gamma-1)p_0}{(\gamma-1)p_1 + (\gamma+1)p_0} \quad (1.1)$$

$$D = \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\rho_0}(p_1 - p_0) + \frac{\gamma p_0}{\rho_0}} \quad (1.2)$$

$$u_1 = \frac{p_1 - p_0}{\rho_0 D_s} \quad (1.3)$$

$$T_1 = \frac{\rho_0 T_0}{p_0} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \quad (1.4)$$

式中, 下标“0”表示初始状态; 下标“1”表示冲击波波阵面上的参量; D 为冲击波波阵面传播速度 (m/s); γ 为质量热容比, $\gamma = c_p / c_v$ 。

这些方程描述了冲击波的基本性质。

3. 空气冲击波波阵面超压

球形装药在无限空气介质中爆炸时冲击波超压可用以下经验公式估算

$$\Delta p_1 \approx 0.082 \frac{\sqrt[3]{m_e}}{R} + 0.26 \frac{\sqrt[3]{m_e^2}}{R^2} + 0.69 \frac{m_e}{R^3} \quad (1.5)$$

式中, Δp_1 ——冲击波波阵面上的超压, MPa;

m_e ——TNT 当量, kg;

R ——爆心距离, m。

TNT 当量装药按下式计算

$$m_e = m_{ei} \frac{Q_{vi}}{Q_v} \quad (1.6)$$

式中, m_{ei} ——试验用炸药量, kg;

Q_{vi} ——试验用炸药的爆热, kJ/kg;

Q_v ——TNT 炸药爆热, 4.18 kJ/kg。

在地面上爆炸时, 地面反射使爆炸效应加强。对于刚性较大的混凝土、岩石表面等, 相当于两倍装药量的效应。如果地面是土壤, 相当药量可取 (1.7~1.8) m_e 。

弹丸 (小药量) 在空中爆炸, 可用以下经验公式计算冲击波超压

$$\text{当 } \Delta p_1 > 1.013 \text{ MPa 时, } \Delta p = 0.679 \frac{m_e}{R^3} + 0.101 \text{ 3}$$

4. 空气冲击波对障碍物的作用

(1) 最大超压载荷。当冲击波运动方向与障碍物刚性壁表面平行时, 作用于刚性壁上的

最大载荷 $\Delta p_m = \Delta p_1$ ；当冲击波运动方向垂直于刚性壁表面时，其所受载荷大大增加，即

$$\Delta p_m = 2\Delta p_1 + \frac{(\gamma+1)\Delta p_1^2}{(\gamma-1)\Delta p_1 + 2\gamma p_0} \quad (1.7)$$

由上式可见，若取 $\gamma=1.4$ ，对于超压值较小的弱冲击波垂直入射时，刚性壁所受载荷最大值为 $\Delta p_m = 2\Delta p_1$ ；对于垂直入射强冲击波，则刚性壁所受最大载荷约为 $\Delta p_m = 8\Delta p_1$ ；如果以一定倾角入射刚性壁时，冲击波将产生斜反射，甚至产生形成马赫波的非正规反射。

(2) 冲量载荷。冲击波超压对障碍物作用有一定的持续时间，使障碍物受到冲量载荷作用。障碍物单位面积上受到的冲量称为比冲量，记为 i ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。

在装药附近 $R \leq 3r_c$ 时，则

$$i \propto \frac{m_e D}{R^2}$$

当 $R > 12r_c$ 时，则

$$i \propto \frac{m_e^{2/3} D}{R}$$

式中， D ——爆速， m/s ；

r_c ——球形装药半径， m 。

在实际计算中可采用以下经验公式

$$i = (196 \sim 245) \frac{m_e^{2/3}}{R} \quad (R > 12r_c) \quad (1.8)$$

如果弹丸在地面爆炸，可取 1.8 倍的装药 TNT 当量来计算比冲量。

5. 弹丸壳体对爆炸的影响

弹丸壳体对爆炸的影响较大，是不能不考虑的实际因素。弹丸爆炸后，炸药能量首先消耗在弹壳的变形和破坏上，并赋予破片一定的初始动能，余下的部分才消耗在爆轰产物膨胀和冲击波形成上，因此，弹丸爆炸形成的空气冲击波比冲量，要比无壳同等装药量爆炸形成的冲击波比冲量小。但是，由于破片还具有一定的比冲量，因此弹丸爆炸后的总比冲量要比无壳装药比冲量大得多。

6. 空气冲击波的破坏作用

冲击波对目标的破坏作用不仅与超压有关，而且还与作用时间有关。如果载荷的作用时间 τ 大于目标体系的自由振动周期 T_0 ，则可认为载荷作用时间长，此时目标的变形或应力取决于最大压力；若载荷的作用时间非常短，大约 $\tau \leq 0.25 T_0$ ，则可认为是冲击载荷，变形与破坏仅取决于冲量的大小，而与最大超压无关。当然，也有人认为对目标的破坏是超压和冲

量共同作用的结果。

经验认为, 当比冲量 $i=2\ 000\sim 3\ 000\ \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 时, 可破坏坚固的建筑物。对飞机来说, 超压 $\Delta p_1=0.05\sim 0.10\ \text{MPa}$ 就可使其严重破坏, $\Delta p_1>0.10\ \text{MPa}$ 时可使其完全破坏; 对舰艇来说, $\Delta p_1=0.03\sim 0.04\ \text{MPa}$, 可使其中等程度破坏; $\Delta p_1=0.07\sim 0.078\ \text{MPa}$ 时, 遭受严重破坏; 对车辆来说, $\Delta p_1=0.035\sim 0.29\ \text{MPa}$, 轻型装甲车辆将受到不同程度的破坏; $\Delta p_1>0.05\ \text{MPa}$ 时可破坏各种轻型兵器 and 引爆地雷; 冲击波对人体的杀伤作用可用其超压来表征, 当 $\Delta p_1<0.02\times 10^5\ \text{MPa}$ 时基本没有杀伤作用, 当 $\Delta p_1=0.03\times 10^5\sim 0.05\times 10^5\ \text{MPa}$ 时, 人体会受到中等程度伤害; 当 $\Delta p_1>0.10\times 10^5\ \text{MPa}$ 时人将致死。

根据第二次世界大战的经验, 小装药量可按下式确定杀伤半径

$$R=1.1\sqrt{m_e}$$

对于掩蔽人员, 冲击波的杀伤半径为暴露情况的 1/2。

1.1.2 水中爆炸

1. 水中爆炸的基本现象

弹丸与战斗部在水中爆炸产生的水中冲击波和气泡脉动都会对水中目标造成一定程度的破坏。由于水的密度大, 可压缩性小, 因此水中冲击波波阵面上的初始压力高达 $10^4\ \text{MPa}$, 波运动速度比较慢, 随着水中冲击波的传播, 其波阵面压力和速度迅速下降, 波形也不断拉宽。此外, 由于波头、波尾速度相差不大, 因此水中冲击波正压区作用时间, 比同距离同药量的空气冲击波要小。

冲击波脱离后, 爆轰产物在水中以气泡的形式继续膨胀, 推动周围的水向外流动。同时气泡内的压力下降, 直至与周围水压相等时, 水介质因惯性仍向外运动, 气泡膨胀到最大半径时。其内压已低于周围静水压力, 水开始反向流向爆心, 同时压缩气泡。同样, 聚合水流因惯性使气泡“过度”压缩, 其内压又高于周围静水压, 一直到阻止气泡的压缩而达到新的平衡, 气泡的第一次循环结束。由于此时气泡内压大于周围介质静压力, 于是又产生第二次膨胀和压缩的脉动过程。如此反复, 在深水中这种脉动过程可达 10 次之多。

在脉动过程中由于浮力作用, 气泡逐渐上升, 水中将形成稀疏波和压力波。通常第一次脉动时所形成的压力波称为二次压力波, 它的压力峰值, 仅为冲击波压力的 10%~20%, 但持续时间长, 其冲量可与冲击波的冲量相近, 不能忽视其破坏作用。以后几次的脉动可不予考虑。

弹丸或装药在水中的实际爆炸情况要复杂得多, 因为水介质有自由表面、水底、目标和水中障碍物存在。

水底有助于冲击波压力的增高。对刚性水底来说,相当于二倍装药量的爆破作用。实际上,对沙土水底,冲击波压力增加约 10%,冲量增加近 20%。

水中障碍物对气泡运动有很大影响。气泡膨胀时,因径向运动受阻,使气泡离开障碍物;气泡受压缩时,障碍物处水流受阻,气泡向障碍物方向移动。

2. 水中冲击波参量计算

在工程上常采用如下经验公式计算

$$p_m = a \left(\frac{m_e^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (1.9)$$

$$i = b m_e^{1/3} \left(\frac{m_e^{1/3}}{R} \right)^\beta \quad (1.10)$$

$$E = c m_e^{1/3} \left(\frac{m_e^{1/3}}{R} \right)^\gamma \quad (1.11)$$

式中, p_m ——峰值压力, MPa;

i ——比冲量, $N \cdot s/m^2$;

E ——水能量密度, kg/m^3 ;

m_e ——炸药量, kg;

R ——爆心距离, m;

a 、 b 、 c 、 α 、 β 、 γ 均为由实验确定的系数,可查有关资料获得。

3. 水中爆炸的二次压力波

TNT 炸药在深水爆炸时,其二次压力波峰值 p_m 可按下式计算

$$p_m = p_0 + 7.1 \frac{m_e^{1/3}}{R} \quad (1.12)$$

式中, p_0 ——与装药同深度处的静水压, MPa。

二次压力波的比冲量 ($N \cdot s/m^2$) 为

$$i = (0.01 \sim 0.02) \frac{m_e^{2/3}}{R} \quad (1.13)$$

4. 水中爆炸的破坏作用

装药在水中爆炸时产生的冲击波、气泡和压力波三者都能使目标受到一定程度的破坏。