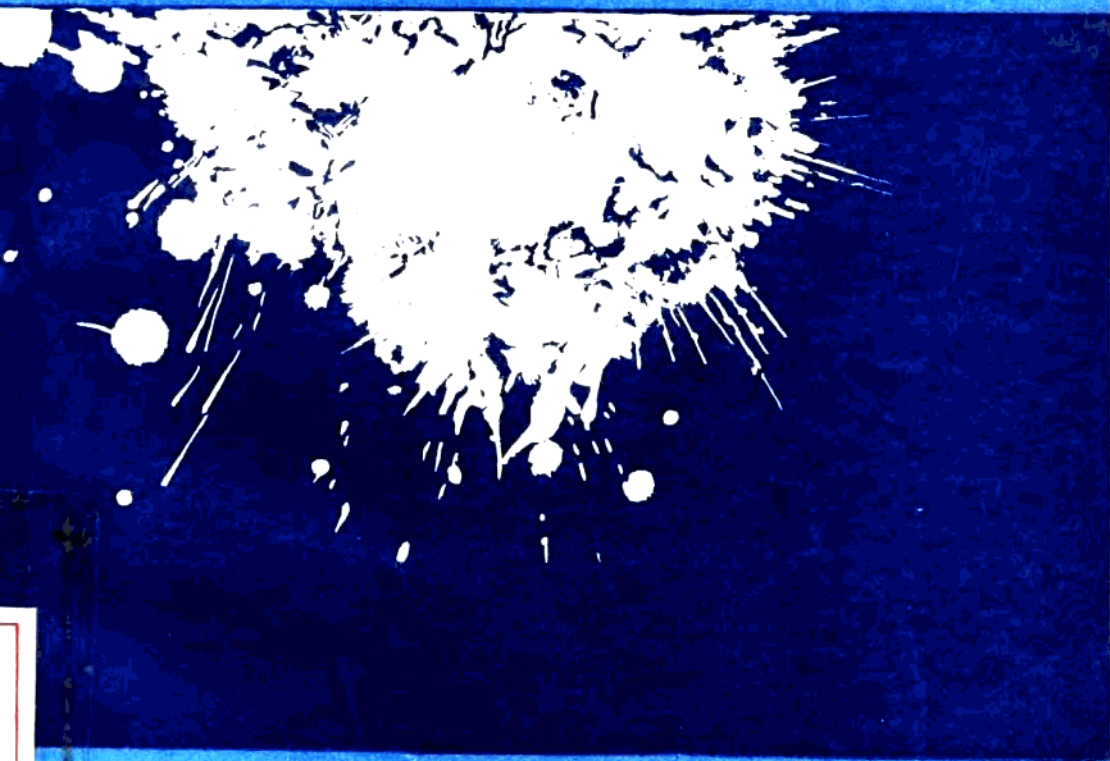


普通高等教育
兵工类规划教材

崔秉贵 编

目标毁伤工程计算



北京理工大学出版社

出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神,兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下,在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准、明确岗位职责,建立了由主审审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点,成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组。以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高、培养国防现代化人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由孟宪昌同志主审,蒋浩征同志复审,张守中同志担任责任编委,兵总教材编审室审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1991年8月

前 言

本书完整、系统地介绍目标毁伤的工程计算方法,可作为弹药战斗部工程专业的本科生和研究生的教材,同时,也可作为从事目标易损性或生存力研究人员的参考书。

作者收集了国内外最新研究成果,目的是使本书内容更加充实。目标毁伤计算是弹药威力设计的基本内容;对于从事飞机、坦克和舰船设计的工程人员,目标毁伤计算是加强防护、提高生存力设计的基本出发点。

本书第二章、第三章为飞机目标毁伤的工程计算,第四章、第五章为坦克目标毁伤的工程计算;第六章至第八章为舰船目标毁伤的工程计算。作为对付各类目标的弹药,在第一章中作了简介。破坏目标的要素是不装炸药的弹丸(破片)、射流、爆轰波、冲击波、应力波以及结构的动力响应。为了便于读者理解本书的内容,附有一定数量的例题。

本书由孟宪昌教授、蒋浩征教授审定,在此深表谢意。

因本人水平有限,错误之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1991年1月于北京

目 录

第一章 弹药简介	(1)
§ 1—1 反飞机弹药简介	(1)
§ 1—2 反坦克弹药简介	(3)
§ 1—3 反舰船弹药简介	(4)
第二章 不装炸药弹丸毁伤飞机的工程计算	(8)
§ 2—1 概述	(8)
§ 2—2 弹道极限速度计算	(12)
§ 2—3 弹丸对金属结构的毁伤计算	(15)
§ 2—4 密集破片对金属结构的毁伤计算	(27)
§ 2—5 弹丸对纤维复合结构的毁伤计算	(28)
第三章 高能炸药弹丸毁伤飞机的工程计算	(34)
§ 3—1 概述	(34)
§ 3—2 高能炸药弹丸破片分布规律	(41)
§ 3—3 破片毁伤金属结构的计算	(46)
§ 3—4 冲击波与准静压毁伤金属结构计算	(55)
§ 3—5 预测结构响应的分析方法	(64)
第四章 聚能破甲弹毁伤坦克的工程计算	(84)
§ 4—1 准定常侵彻理论破甲工程计算	(84)
§ 4—2 圆管模型聚能破甲工程计算	(92)
§ 4—3 平板模型聚能破甲工程计算	(98)
§ 4—4 流体-弹塑性理论的破甲工程计算	(107)
§ 4—5 线性聚能破甲工程计算	(110)
第五章 穿甲弹毁伤坦克的工程计算	(114)
§ 5—1 穿甲弹破坏特性	(114)
§ 5—2 侵彻深度的经验公式	(118)
§ 5—3 长杆式脱壳穿甲弹对半无限厚靶板侵彻工程计算	(123)
§ 5—4 长杆弹对三层间隔靶的破坏计算	(126)
第六章 直接作用弹药毁伤舰船工程计算	(131)
§ 6—1 大口径半穿甲爆破弹毁伤舰船工程计算	(131)
§ 6—2 自锻破片对舰船毁伤的工程计算	(136)
§ 6—3 定向爆破战斗部毁伤舰船的工程计算	(138)
§ 6—4 多 P 战斗部毁伤舰船工程计算	(141)
§ 6—5 水中爆破弹毁伤工程计算	(143)

第七章 水下爆炸对舰船结构毁伤的工程计算 (146)

§ 7—1 水面舰艇冲击环境理论 (146)

§ 7—2 水下非接触爆炸对舰艇总纵向强度与局部强度影响分析 (156)

§ 7—3 舰船设备冲击响应分析的有限元法 (163)

第八章 水下爆炸对艇员损伤计算 (171)

§ 8—1 人体对舰艇冲击运动响应综述 (171)

§ 8—2 人体冲击加速度容限计算 (176)

§ 8—3 水下爆炸艇员受力分析 (180)

参考资料 (183)

第一章 弹药简介

§ 1—1 反飞机弹药简介

反飞机的弹药可分为两类：不装炸药的弹丸和装有高能炸药的弹丸。不装炸药的弹丸对目标毁伤主要是贯穿作用，不产生爆破作用；高能炸药弹丸装有炸药并配置引信，对目标毁伤主要是破片贯穿和冲击波超压作用。

不装炸药的弹丸包括子弹(B)、穿甲弹(AP)、穿甲燃烧(I)曳光(T)弹。子弹按标准尺寸口径分为 7.62mm(图 1-1-1)、12.7mm(图 1-1-2)和 14.5mm(图 1-1-3)。这些子弹由实心金属杆和薄金属帽组成。口径比 14.5mm 大的不装炸药的弹丸是 23mm 的弹丸。子弹的典型品种是 7.62mm 的，它有一个比较软的芯子，在碰击目标时变形。必要时可用于前沿阵地反击飞机。穿甲弹丸具有弹芯，现代的弹芯是钨合金，用以贯穿目标。穿甲燃烧曳光弹丸的引燃剂，碰击目标时可点燃易燃物，如燃料和液体油料，曳光剂系燃烧发光材料，借以观察飞行弹道。

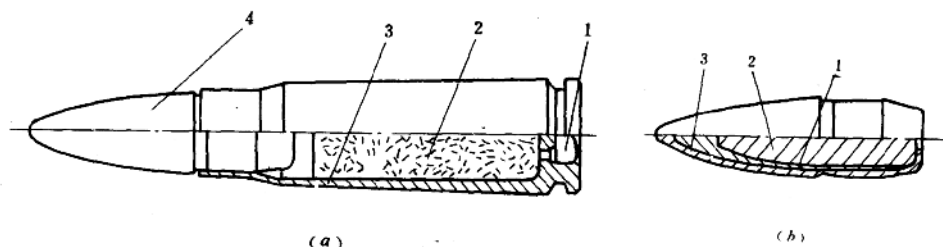


图 1-1-1 7.62mm 普通弹

(a) 1. 通用底火 2. 发射药 3. 弹壳 4. 普通弹头

(b) 1. 铅套 2. 钢芯 3. 弹头壳

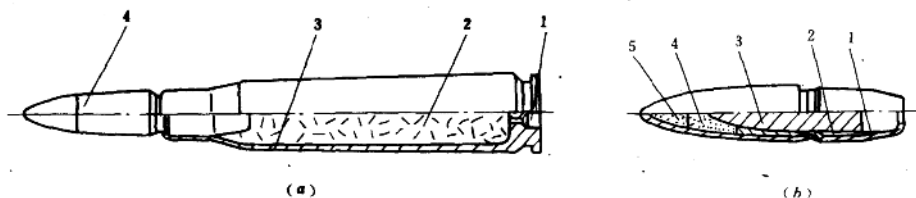


图 1-1-2 12.7mm 穿甲燃烧弹

(a) 1. 通用底火 2. 发射药 3. 弹壳 4. 穿甲燃烧弹头

(b) 1. 弹头壳 2. 铅套 3. 穿甲弹芯 4. 铝镁合金粉 5. 硝酸钡

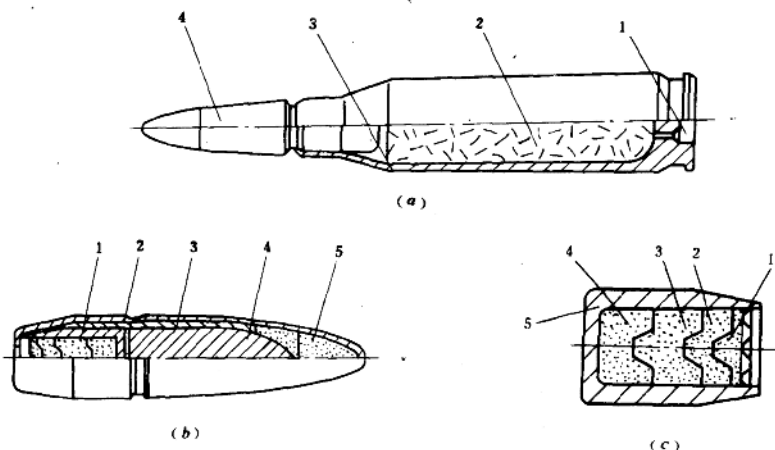


图 1-1-3 14.5mm 穿甲燃烧曳光弹

(a) 1. 通用底火 2. 发射药 3. 弹壳 4. 穿甲燃烧曳光弹头

(b) 1. 弹头壳 2. 铅套 3. 穿甲弹心 4. 铝镁合金粉 5. 硝酸梗

(c) 1. 引燃剂 2. 传火剂 3. 曳光剂 4. 曳光剂 5. 管壳

表 1-1-1 给出了西方国家轻武器和反飞机航炮不装炸药弹丸的质量和特征尺寸。在多数情况下,轻武器弹丸是从地面发射的。7.62mm 弹丸是步兵用冲锋枪或机枪发射的。事实上,机枪射击速度高,对射程范围内低速飞行的飞机有威胁,口径 12.7mm 的弹丸的威胁在于四管重型机关枪的高速射率。口径 14.5mm 的重型机关枪是反击亚音速飞行的飞机的一种武器。口径比 14.5mm 大的弹丸一般由地面火炮发射,但也有从航空机关炮发射的,例如,口径 23mm 穿甲燃烧弹由雷达控制航空机关炮高速射击,具有很大的威胁性。

表 1-1-1 轻武器弹丸特征数据

弹丸名称	质量(g)	长度(mm)	结 构
7.62mm API	7.8	27.4	包复钢帽、钢芯、铅套、燃烧剂
12.7mm API	47.8	63.5	同上
14.5mm APIT	59.7	68.0	黄铜背帽、钢芯、铅套
23mm APIT	19.5	99.3	钢弹体、穿甲弹芯、没背帽

最后一种典型的不装炸药的弹丸是导弹战斗部破片,是由地一空(SAM)或空一空(AAM)导弹携带的杀伤战斗部产生的。导弹杀伤战斗部通常由炸药装药和预制破片加壳体构成。壳体有刻槽壳体和整体式壳体。战斗部通常配置近炸引信。爆炸时,破片以高速抛出(静爆时速度为 3050m/s 是不难达到的)。单个破片的形状和质量取决于战斗部的类型和所要对付的目标。预制破片的形状有球形、立方体、菱形、长圆柱等,质量为 3.25~13.0g。

虽然导弹战斗部破片的破坏效应类似于不装炸药的弹丸,但战斗部爆炸时,还伴有爆炸冲击波的超压破坏,超压的强度取决于战斗部装药的类型、数量和离开爆心的距离;另外,飞机必须命中多个破片,才能造成一定的杀伤破坏效果。

§ 1—2 反坦克弹药简介

反坦克弹药不同于反飞机的弹药,主要由于坦克具有很厚的防护装甲。按作用效应分类有:聚能破甲弹、动能穿甲弹和自锻破片弹(战斗部)。

一、聚能破甲弹

聚能破甲弹是利用聚能效应形成的高速射流击穿装甲目标的弹药。聚能效应既广泛应用于榴弹,火箭弹和炮弹,也广泛应用于反坦克导弹、地雷和航空子母弹。其结构特点是装药一端具有空穴并带紫铜等金属药型罩,由另一端引爆,图 1-2-1 是一种典型聚能装药战斗部结构图。它由风帽组件、弹体、炸药装药、药型罩等组成。战斗部前端是电力引信的头部机构。

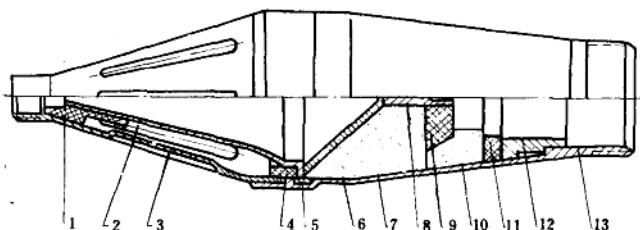


图 1-2-1 破甲弹结构

1. 定位套 2. 内锥罩 3. 风帽 4. 压紧环 5. 绝缘环 6. 药型罩
7. 主药柱 8. 导电杆 9. 隔板 10. 副药柱 11. 绝缘垫圈
12. 衬套 13. 弹壳

当战斗部碰击目标时,压电引信的压电晶体便产生电荷,电荷的一个回路是内锥罩、药型罩、导电杆到引信的底部结构;另一个回路是风帽、弹体到引信底部结构。电流通过电雷管并使之起爆,进而引爆副药柱,再由副药柱引爆主药柱,使药型罩在爆轰压作用下,产生射流破甲。聚能破甲的主要杀伤元素是射流,而与弹丸本身的速度无关,所以能适应各种炮的发射方式。但是,弹丸的旋转运动却对射流效能产生不利影响,故对弹丸的转速应加限制。

二、穿甲弹

穿甲弹与聚能破甲弹破坏机理不同,穿甲弹利用本身的动能击穿装甲。为了提高穿甲弹的穿甲能力,发展了长径比大的尾翼式的脱壳穿甲弹(图 1-2-2)。图中(a)是马靶形弹托尾翼式脱壳穿甲弹,(b)是窄环形弹托尾翼式脱壳穿甲弹。它们的穿甲部分是弹芯,要求其具有很高的强度和硬度,以保证发射时的强度和大着角碰击目标时的穿甲性能。通常由优质合金钢材料制造,并经过热处理以提高其机械性能。长杆超速穿甲弹长细比大,原则上不受稳定性限制,可以获得很大的长细比,因而,穿甲威力大。而其长细比是由多种因素决定的。

长杆超速穿甲弹初速高,直射距离远,射击精度高且后效作用大,大着角不跳飞。因此,成为反坦克加农炮和坦克炮的主要弹种。但脱壳时,卡瓣飞散不规则,落地散布范围很大(据统计大约落在距炮口 20~1000m),对己方人员安全有威胁;其次,弹体仅靠弹托与发射药筒连接牢固性差,在搬运、装卸及装填等勤务处理过程中,应特别注意防止碰撞与强烈振动。

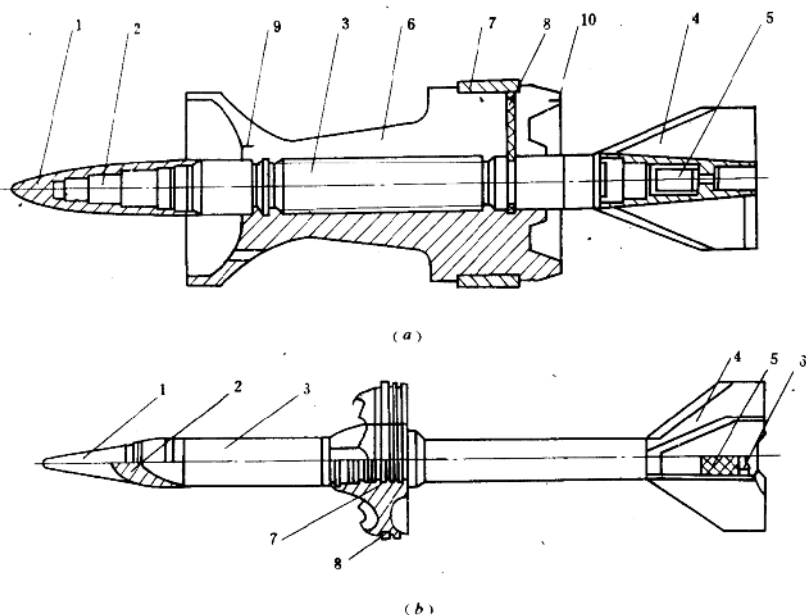


图 1-2-2 尾翼式脱壳穿甲弹

(a) 1. 风帽 2. 穿甲块 3. 侵彻体 4. 弹尾 5. 曳光管 6. 弹托卡瓣 7. 弹带 8. 橡胶密封圈 9. 前紧固环 10. 后紧固环

(b) 1. 风帽 2. 被帽 3. 侵彻体 4. 尾翼 5. 曳光管 6. 压螺 7. 卡瓣 8. 闭气环

在反坦克弹药的发展过程中,还出现过碎甲弹。其破坏机理是应力波理论的“崩落效应”,即在装甲背面由应力波反射而产生的具有一定质量和速度的碟形破片。但对复合装甲和屏蔽装甲的效应极差,在使用上受到了限制。

§ 1—3 反舰船弹药简介

反舰船弹药有炮弹、水雷、鱼雷、深水炸弹和反舰导弹。

一、舰炮弹药

火炮是古老的海战武器之一。历次海战都大规模地使用火炮,用以对付各种舰艇、飞机和岸上目标。

由于科学技术的发展,舰基航空兵和岸基航空兵发挥巨大作用,再加上导弹的发展,舰炮的作用明显地减小,现在除英、美、苏等国在少量军舰上还保留有 130~203mm 的舰炮外,其余舰炮口径都在 130mm 以下。配备的弹药主要有穿甲爆破弹、爆破杀伤弹等。

根据两次世界大战的统计,中口径炮弹破坏敌舰需命中平均弹数如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 破坏舰船所需命中炮弹数

舰 种 \ 弹径(mm)	180	152	130	100
重巡洋舰	30	40	/	/
轻巡洋舰	20	30	40	/
驱逐舰	7	10	12	15

二、水雷

水雷出现于 19 世纪初叶,经过技术改进,现在仍然应用。水雷预先布置在需要设防的海域或航道上,当敌方舰艇经过这些水域时,水雷爆炸击毁舰艇;由于水雷装药量大,爆炸破坏力很强。水雷有锚雷、水中漂雷和水底水雷。

目前有的国家在研制新型水雷,如自航水雷,快速攻击水雷,火箭上浮水雷和夹壳水雷。自航水雷可以到达布放工具不能进入的海域,对于隐蔽水雷是非常有利的;火箭上浮水雷可由舰艇、潜艇或飞机布雷,并能发现、分辨和确定舰艇和潜艇的位置,亦能发现、分辨和确定水面航行潜艇和潜航潜艇;夹壳水雷使用于具有战略意义的深水航道上,阻止敌潜艇偷越。

近年来,尽管出现了导弹、核武器等大威力武器,但水雷的作用仍不可低估。一般认为:现代水雷仍是反击舰船的优选弹种。其优点是生产周期短,造价低,可以长期储存,具有隐蔽、突发性强,长期威胁性强,破坏力大,攻守兼备等。

三、鱼雷

鱼雷是导弹的初型,用以破坏舰船最关键的水下部分,可能造成灾难性的后果。鱼雷具有动力装置,可以加速航行。鱼雷操纵仪表在其运动过程中控制方向和深度。主要用于攻击敌方水面舰艇和潜水艇。

鱼雷可以由水面舰艇发射、潜水艇发射,由飞机投放,也可以由火箭或导弹运载。根据动力装置不同,可以分为蒸汽瓦斯鱼雷、电动鱼雷和航空鱼雷,前两种是水平发射的,后一种是飞机投放的。现代鱼雷由于装药量增加,并装填高能炸药,配置磁感应式和音响式非触发引信,其破坏能力大大提高了。鱼雷的破坏作用主要是爆破效应。

四、深水炸弹

深水炸弹又称深水火箭弹,是目前反击潜水艇的主要武器。巡洋舰、驱逐舰、护卫舰和小型反潜舰艇都装备有深水炸弹的发射炮,一次齐射可发射 12~24 枚。由于炮管安装角不同,可以覆盖很大面积。

深水炸弹装有火箭发动机,可以加速航行,有利于捕获目标。

深水炸弹一般配置定时或定水压引信。战斗部多数为高能炸药的爆破战斗部。

五、航空炸弹

航空炸弹用于攻击军舰的历史较短。航空母舰的出现,起到了活动机场的作用。开始用航空炸弹对付军舰。

航空炸弹分爆破式炸弹、穿甲式炸弹和半穿甲式炸弹。第二次世界大战后,主要资本主义国家大力改进和发展了超音速炸弹、减速炸弹和制导炸弹。质量也加大了,穿甲弹达到1000kg,半穿甲炸弹达到1800kg,爆破弹达到5500kg。

爆破式炸弹在舰舷附近水中非接触爆炸,水中冲击波的作用比直接命中对舰船的破坏更为严重;穿甲式炸弹或半穿甲式炸弹命中舰船,打穿装甲进入舱内爆炸,是最危险的。

六、反舰导弹

现代海军已装备各种型号的导弹。有战略导弹,还有大量的战术导弹;战术导弹有舰、潜、空对舰导弹,潜对潜导弹等;有弹道式的,飞航式的;有核装药的,但更大量的为高能炸药装药。常规导弹所配备的战斗部有爆破战斗部、聚能破甲战斗部、半穿甲爆破战斗部、半穿甲杀伤战斗部等。

表 1-3-2 列出部分国外现役的战斗部诸元。

表 1-3-2 部分现役导弹战斗部诸元

序号	国 别	名 称	全弹发射 质量(kg)	战 斗 部			备 注
				类 型	质量(kg)	炸药量(kg)	
1	苏	‘冥河’舰-舰	2100	聚能穿甲	512	380	
2	法	‘飞鱼’MM-38 舰-舰	720	半穿甲	165	48	
3	以色列	‘迦伯利 I’舰-舰	440	爆 破	180(150)	100	
4	挪威	‘企鹅’舰-舰	330	半穿甲	120		
5	美	‘秃鹰’空-舰	966	爆 破	286		
6	意大利	‘海上凶手 I’舰-舰	300	半穿甲	70	25	
7	西德	‘鸬鹚’空-舰	600	半穿甲	150	55	
8	美	‘白星眼 I’空-舰	499	爆 破	385	200	
9	法意	‘奥托马特’舰-舰	790	半穿甲	210	60	
10	美	‘捕鲸叉’多用途	667	半穿甲	227	90	

1. “冥河”导弹战斗部

“冥河”舰-舰导弹,大约在 1959 年开始服役,主要装在导弹艇上组成突击兵力,用于击毁敌大中型水面舰船。使用范围包括近海、公海,甚至可达敌岸附近。这种导弹及快艇约在 20 个国家服役。

“冥河”战斗部(图 1-3-1),质量 510kg,装炸药 380kg,装填系数为 74.5%。最初的炸药装药是 TrAr-5 混合炸药,后改装为威力更高的“MC”混合炸药。战斗部外形近于圆柱形,直径 700mm,长度 800mm。战斗部前端有一个半球形钢质药型罩,外径 500mm。战斗部配用两种触发引信,其中电引信两个,机械引信一个。电引信的触发传感器,安装在导弹第一框及两翼前缘,引信同时引爆战斗部后端的

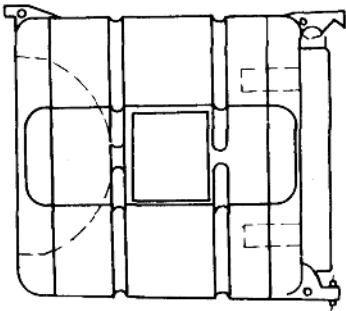


图 1-3-1 冥河战斗部结构图

四个传爆药柱,以增强向前的爆破和聚能破坏效应。

2. “鸬鹚”(Kormoran)导弹战斗部

“鸬鹚”是空—舰导弹战斗部,是根据德国海军对付 4t 以上水面舰艇的要求研制的,1974 年装备服役。

“鸬鹚”战斗部质量 160kg,装填 Tr/50 : 50 混合高能炸药 55kg。其战斗部结构(图 1-3-2)特点是在 0.344m 直径的圆柱段上沿环向焊有 16 个椭圆形较浅的锥形药型罩。椭圆的长轴 150mm,短轴 100mm。壳体由钢锻件加工而成,圆柱段壁厚为 12mm,头部防跳装置是环状的。

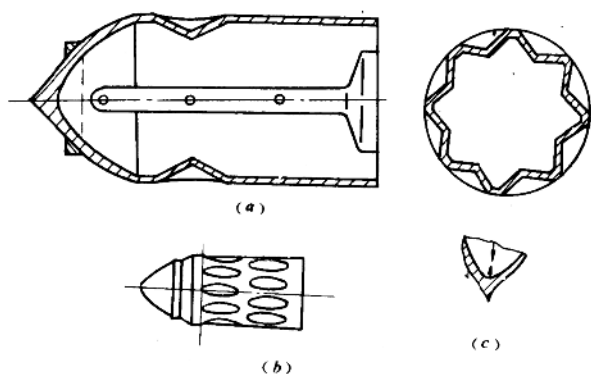


图 1-3-2 “鸬鹚”战斗部

“鸬鹚”战斗部在舰内爆炸,主要靠椭圆形的药型罩产生自锻破片和爆破作用来破坏目标,同时,还有破片的杀伤作用。对称安装在壳体上的浅椭圆形罩,相当于广泛应用的大锥角药型罩,在炸药爆炸作用下,产生高速自锻破片,具有很高的动能和穿甲威力。

“鸬鹚”战斗部只配备触发延期引信,延迟时间 14ms,战斗部进入舰内约 3-4m 处爆炸,三点同时起爆,以保证形成对称的自锻破片。

第二章 不装炸药弹丸毁伤飞机的工程计算

§ 2—1 概 述

一、弹丸与目标的遭遇参数

打击速度、弹丸攻角和着角是遭遇参数。为计算贯穿和破坏能力,必须定量描述这些参数。导弹战斗部爆炸将产生大量破片,需计算目标单位面积所命中的破片数。

打击速度 v (m/s): 打击速度是弹丸命中飞机瞬间弹目的相对速度。打击速度 v 可由向量合成法计算求得。并由此可求出打击动能。

攻角 $\alpha(^{\circ})$: 攻角是弹丸弹轴与速度向量的夹角。

着角 $\theta(^{\circ})$: 着角是目标的法线与弹丸速度的夹角。

在设计中,遭遇参数是设计准则的一部分,其数值往往是预期的典型值,或最不利条件下的数据。

对于运动目标来说,遭遇参数必需以相对参数进行计算。例如,若飞机作水平匀速直线运动,弹丸攻角、侧滑角均为零,且弹丸和目标认为处在同一平面内(图 2-1-1),则相对速度 v 为

$$v = (v_p^2 + v_a^2 - 2\cos(90^{\circ} + \theta))^{1/2}$$

式中 θ 着角; v_p ——弹丸速度; v_a ——目标速度。

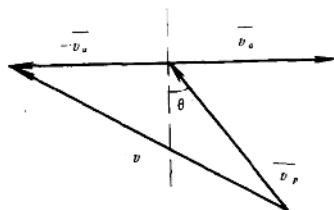


图 2-1-1 相对速度示意图

二、弹丸对金属结构的毁伤

弹丸具有相当大的动能,可以穿透最强的飞机零件。

12.7mm 口径的穿甲弹撞击钢或铝合金板穿透能力表示在图 2-1-2 中。曲线的纵坐标是 v_{50} , 称为弹道极限,其含意是在命中条件下,50%弹丸贯穿时的打击速度。由曲线可以看出:当弹丸速度不低于 335m/s 时可以穿透 3.8mm 厚的铝合金板。观察试验结果:不仅板上出现裂纹,而且板的正反两面还有崩落碎片。若弹丸打进油箱,由于弹丸的冲击及其在液体里减速消耗能量,将会导致“流体动压”作用于箱壁上。这种作用通常造成附加的结构破坏。

贯穿毁伤效应取决于弹丸、目标的结构特性和遭遇条件。一般分为凹陷、裂纹、穿孔和伴随板外面大面积变形的花瓣。就毁伤特性来讲,怎样把它们定量化? 而又怎样测量? 是实际研究中必须解决的重要问题。

贯穿毁伤效应有多种计量方法,易损性分析时采用的是最大破坏尺寸,如图 2-1-3 中的 L_D ,在作用力垂直方向的投影为 TL_D 。 L_D 包含裂纹、穿孔、崩落的最大尺寸。在此最大破坏尺寸、破坏尺寸和有时使用的破坏作同义词使用。

被弹丸击中后金属结构的动态响应,取决于许多互相联系的因素,且试验结果散布较大,单项影响因素定量化试验是困难的,所以单因素破坏的定量计算也是困难的。

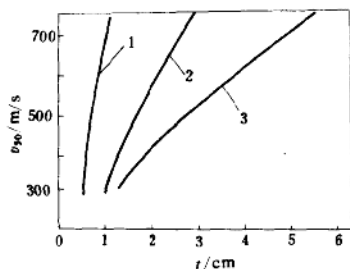


图 2-1-2 穿甲弹对金属板的穿透能力

1. 4340 钢 2. 6Al-4V 3. 7075-T6 或 2024-T3

1. 破坏类型

打击金属板破坏类型有裂纹、崩落、花瓣、穿孔、凹陷或擦痕等。对于同一种材料,破坏类型取决于板厚、弹丸速度和着角。若着角一定时,弹丸速度 v_p 与材料厚度 t 影响破坏的情况如图 2-1-4 所示。

2. 单项破坏因素分析

(a) 弹丸速度的影响:当目标厚度一定时,着角一定,不同打击速度造成的破坏如图 2-1-5 所示。这个图也表示了初始破坏、最大破坏和高速破坏。这种破坏是用最大破坏尺寸表征的,而最大破坏刚好发生在弹道极限附近。在较轻的破坏阶段,破坏程度随着弹丸速度的增加而加大,到最大破坏速度,之后速度增加,破坏尺寸降低,到高速破坏速度,破坏尺寸趋于平稳。

(b) 着角的影响:着角对破坏尺寸有明显的影 响,其 1,当已出现穿孔,其它条件不变,若着角增加,最大破坏也随着增加;其次,初始破坏、最大破坏和高速破坏所要求的速度,随着角的增加而加大。图 2-1-6 表示了着角、速度和破坏尺寸的关系。若目标厚度一定,以一定的速度碰击,则着角增加,破孔加大,当着角在 60° 以上时,弹丸跳飞,不产生穿孔。

(c) 弹头形状的影响:一般是弹丸直径大破坏尺寸也大。但不能仅根据弹丸直径来判断破坏类型,还需考虑弹头形状。尖头弹丸和密集破片有 1. 开始破坏速度 2. 最大破坏尺寸速度 3. 高速破坏起点

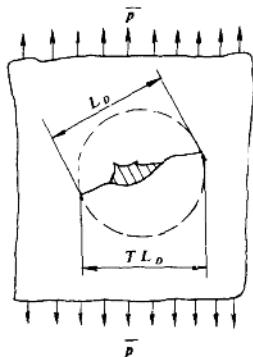


图 2-1-3 破坏定义图

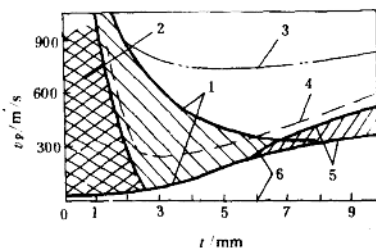


图 2-1-4 v_p-t 对破坏的影响

(7. 62mmAP 对 7075-T6 合金铝)

1. 裂纹 2. 花瓣 3. 正面背面崩落
4. 背面崩落 5. 穿孔 6. 未破坏

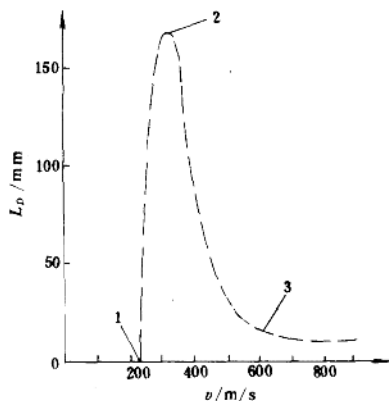


图 2-1-5 $v-L_0$ 曲线

明显不同。旋转稳定的尖头弹丸在贯穿过程中,能有效地产生一个楔形力,使目标产生裂纹。密集破片容易贯穿,甚至在相当低的速度时,也产生不同形式和尺寸的破孔,如图 2-1-7 所示的。

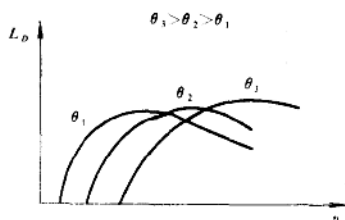


图 2-1-6 $\theta-L_D$ 曲线

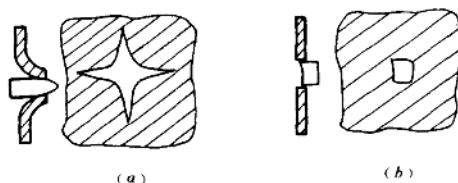


图 2-1-7 弹头形状与破坏特性示例

(a) 尖头弹丸穿孔 (b) 破片穿孔

(d) 板厚的影响:破片尺寸主要取决于目标厚度,取无量纲的相对板厚参数 t/L_p —目标厚度与弹丸长度之比作影响参数。当 t/L_p 值以 0.1 的步长增加,最大破坏尺寸从相当弹丸直径开始增加,直增加到一相当大的尺寸。对于铝和钛合金,最大破坏出现在 $(0.3 \sim 0.4)t/L_p$ 之间, t/L_p 超过 0.4 时,破坏尺寸反而减少到弹丸直径的大小。但可能出现崩落现象。

(e) 目标材料的影响:不同材料的破坏尺寸和类型有显著的不同。这是由于材料的强度不同,产生的响应不同。以相同的碰击条件,不同的材料作试验,破坏尺寸将有很大的差别。如 2024—T3、2024—T81 和 7075—T6 铝合金进行对比试验,破坏尺寸比为 1、2.2 和 5.1。在同样条件下,6Al—4v 钛板为 1.8。以抗破坏能力排序为 2024T3,6Al—4v,2024—T81,7075—T6。这是由材料特性决定的。所以选材是非常重要的。

如果材料受预应力,则碰击点出现不稳定的裂纹,破坏范围也将扩大。通常碰击破坏所产生的应力(称碰击破坏强度或切口应力)比没有预应力时低。应力低于这个值时,对破坏尺寸和方向没有作用。现在还没有办法进行计算。

三、弹丸对纤维复合材料的贯穿破坏

纤维复合材料有较强的抗破坏能力,影响弹丸侵彻的材料特性是:正交各向异性的强度和刚度;纤维的低韧性;层间的低强度。下面讨论破坏响应的特性。

1. 破坏类型

小口径弹和破片对层状的石墨/环氧树脂的破坏形式表示在图 2-1-8 中,包括穿孔、层的分离。

弹丸对纤维复合材料的穿孔孔径接近于弹径;不同于对金属材料穿孔大于弹径且产生散射裂

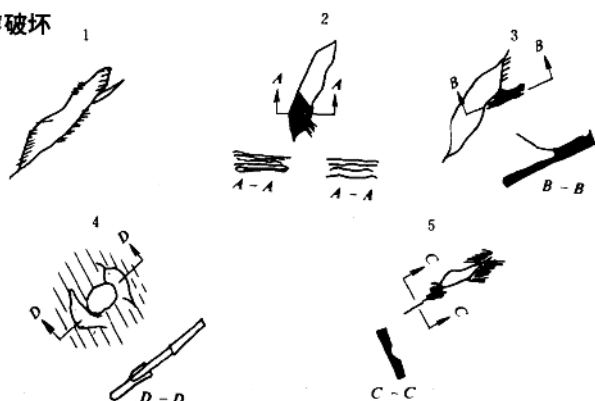


图 2-1-8 复合材料破坏典型形式

1. 穿孔 2. 脱层 3. 剥落 4. 纤维断裂 5. 表面分离

纹,复合材料破坏只限于穿孔,和伴有表层的脱落。

2. 影响破坏的因素

a. 弹丸速度的影响:小口径弹丸和破片打击纤维复合材料层板,直观的破坏尺寸相对于弹丸速度不灵敏。薄板与厚板不同,薄板破坏与速度无关;对于厚的石墨/环氧树脂,破坏尺寸当 $v/v_{BL} < 1.3$ 时,随 v/v_{50} (速度/弹道极限) 的增加,迅速增加;当 $v/v_{50} \geq 1.3$ 时, v/v_{50} 增加,破坏尺寸保持常数。

b. 着角的影响:和金属材料一样,纤维复合材料的破坏尺寸随碰击时着角增大而加大,图 2-1-9 是典型的着角—破坏曲线。

c. 板厚的影响:层板厚度对贯穿破坏有重要作用。薄板的破孔直径近似等于弹径。这个结论不能扩展到厚板,因为厚板破坏的正面可能广泛地脱层,有时背面出现崩落。和金属材料一样,板厚与弹丸长度之比适用于讨论厚度影响参数。图 2-1-10 是石墨/环氧树脂破坏的曲线。

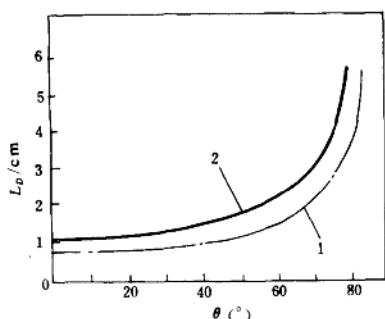


图 2-1-9 $\theta-L_D$ 曲线

1. 翻/环氧树脂厚板, 7.62AP
2. 玻璃纤维/环氧树脂 0/±45/90 薄板, 6mm 软钢立方破片

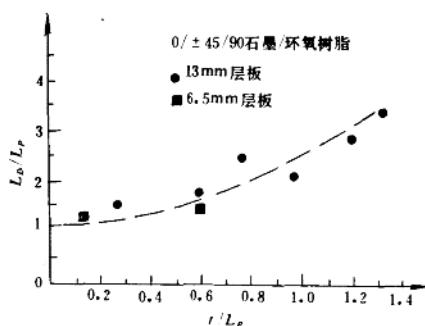


图 2-1-10 $L_D/L_P-t/L_P$ 曲线

$\theta=0^\circ$ 6.5mm 层板 • 13mm 层板

四、弹丸贯穿装满液体的容器

在大多数的飞机上,仓体结构兼作燃料箱,因而,弹丸贯穿并进入液体介质之后,再穿进相邻结构。“流体动压”被认为是贯穿弹丸在流体里传递能量的动压作用。这种压力传播到箱壁,可能造成结构的破坏。

碰撞初期和穿孔入口壁的流体产生一个球面冲击波。冲击波的压力随传播距离的增加而衰减,但在入口壁面,“流体动压”现象的冲击脉冲压力可造成严重的破坏。

图 2-1-11 表示“流体动压”作用的第二个状态,称为“滞动”现象,弹丸在流体里运动速度降低,若弹丸翻转,速度降低更严重。图 2-1-12 表示作用在容器壁上的相应压力脉冲,使弹丸的动能转化成液体的动能和势能。

流体动压为装有液体箱体破坏因素之一。这种破坏是由压力传播到箱壁,造成弯曲、撕裂等。由于弹丸贯穿,在入口和出口壁处破坏特别剧烈。由小口径弹丸和破片产生的流体动压破坏,范围可能是比较大的,而且是严重的。

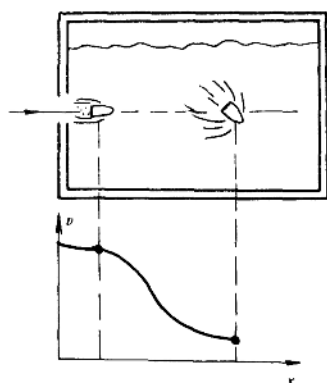


图 2-1-11 弹丸在流体里减速翻转

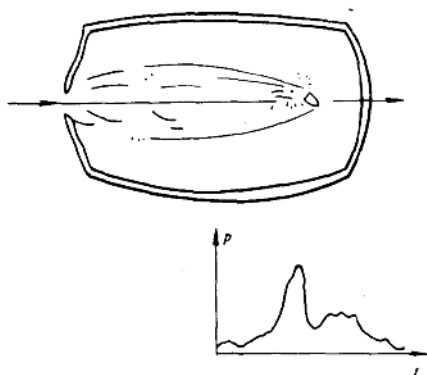


图 2-1-12 作用在壁上的脉冲压力

§ 2—2 弹道极限速度计算

有许多方法可以确定弹丸贯穿目标的能力。常用的一种贯穿表示方法是弹道极限。相应的定义表示在图 2-2-1 中。

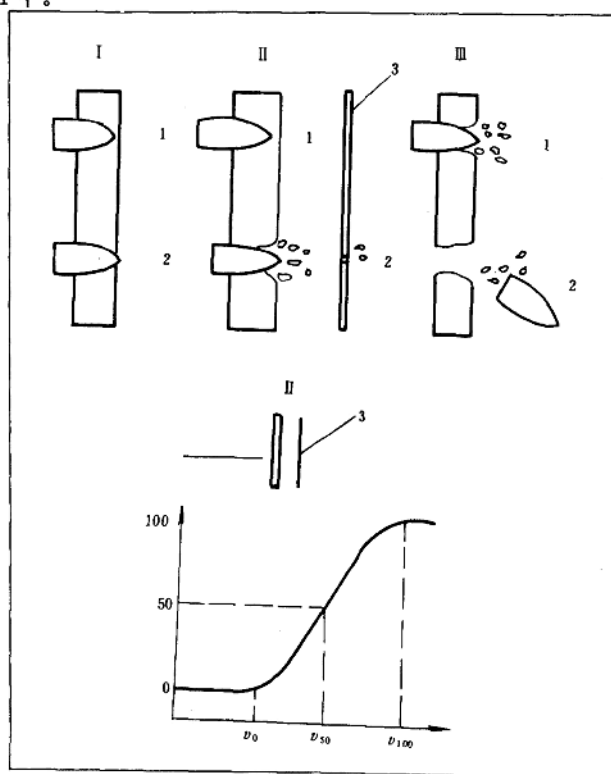


图 2-2-1 常用的弹道极限

■ 陆军弹道极限 ■ 防护弹道极限 ■ 海军弹道极限