

军队“2110工程”系列教材

飞机战伤 模式与机理

FEIJI ZHANSHANG MOSHI YU JILI

姚武文 著



航空工业出版社

军队“2110工程”系列教材

飞机战伤模式与机理

姚武文 著

航空工业出版社
北 京

内 容 提 要

本书系统地论述了飞机的战伤机理与战伤模式。主要阐述了飞机的威胁机理、飞机打击（破坏）试验、飞机典型战伤与损伤事例、飞机战伤理论分析、飞机构件打击损伤计算模型、飞机通用战伤模式及飞机典型材料、典型结构、发动机、系统附件、电气部件的战伤模式等内容。

本书不仅作为相关研究单位、工厂、部队工程技术人员的参考资料，也可作为航空装备战伤抢修训练的培训教材及有关院校航空修理专业本科生、硕士研究生的教材。

图书在版编目 (C I P) 数据

飞机战伤模式与机理/姚武文著. —北京: 航空工业出版社, 2006. 12

ISBN 7 - 80183 - 851 - 3

I. 飞... II. 姚... III. 军用飞机—损伤—研究
IV. V271.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124998 号

飞机战伤模式与机理 Feiji Zhanshang Moshi yu Jili

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64919539 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2006 年 12 月第 1 版

2006 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 8.625

字数: 227 千字

印数: 1—3000

定价: 20.00 元

前 言

飞机战伤抢修是高技术局部战争中损伤飞机“再生”的最佳途径，是保持和提高航空兵部队持续作战能力最直接、最有效、最经济的手段，是战斗力的“倍增器”。

历史经验表明，战争中战伤飞机的数量远远超过战损飞机的数量。例如，在抗美援朝战争中，我空军每损失一架飞机，就有3.3架飞机战伤；在第二次世界大战的太平洋战争中，美军每损失一架飞机，就有2~4架战伤飞机需要抢修；美军在越南战争的参战飞机总数中，未受损伤的占21%，战损的占23%，有56%受到不同程度的损伤；其中F-4战斗机，每损失一架，就有4架是带伤返回的；1973年中东战争，以色列每损失两架F-4战斗机，就有9架是战伤的；英阿马岛冲突中，英国参战飞机总数中战伤的占40%。历史表明，对战斗机来说，战争中每损失一架飞机就有3~5架受伤。如果飞机的生存力和保障条件良好，敌方威胁力中等，通过计算机模拟显示，战损与战伤的比例可高达1:15甚至1:20。直升机与坦克也基本相同。

未来战争是武器装备的激烈对抗和生死较量，战损、战伤在所难免。而技术复杂、价格昂贵的高新武器装备数量有限，必须依靠战伤抢修，弥补数量的不足，增大出动强度，以保持武器装备的持续作战能力。

可见，未来战争中飞机维修的重点任务是对战伤飞机实施抢修。而要对战伤飞机实施抢修，必须全面、准确地弄清飞机战伤及其影响，才有可能针对不同的战伤做出合理的战伤评估，并制定出抢修预案。

在战争中，飞机的威胁机理复杂多变，特别是攻击武器的射程、打击精度、杀伤威力和威胁方式等性能不断改善，使其破坏机理从传统的硬杀伤方式，向多样化方向发展，导致飞机的战伤机理和战伤模式更加复杂化。近三十年来，美、德、英等国十分重视飞机战伤研究，并通过实弹打击试验和模拟仿真等手段，在该方面做了大量工作，而我国近几年才系统开展这方面的研究工作。

本书针对空空导弹等武器的杀伤特点，通过实弹打击试验、典型战伤事例分析、建模计算和理论分析等多种方法，系统地研究了飞机的战伤机理、飞机通用战伤模式和飞机典型材料、典型结构、发动机、系统附件、电气部件的战伤模式等内容，旨在为飞机战伤评估和抢修预案制定提供战伤分析的方法和具体抢修的对象。

本书由刘海沙副教授、焦良教授主审，并得到了吕伯平副教授和于克杰等教授的大力支持，提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，错误之处望批评指正。

编 者

2006年5月于空军第一航空学院

目 录

第1章 飞机威胁机理与打击试验	(1)
1.1 飞机的威胁机理	(1)
1.1.1 导弹杀伤战斗部对飞机的威胁机理	(2)
1.1.2 防空火炮对飞机的威胁机理	(8)
1.1.3 在外部因素影响下飞机自身的威胁机理	(9)
1.2 飞机地面破坏打击试验	(9)
1.2.1 飞机地面外爆炸破坏试验	(9)
1.2.2 飞机地面内爆炸破坏试验	(11)
1.2.3 飞机发动机破坏试验	(13)
第2章 飞机典型战伤与事故损伤事例	(15)
2.1 飞机典型战伤事例	(15)
2.1.1 某飞机空中被破片式战斗部击伤事例	(15)
2.1.2 第二次世界大战中几种著名飞机战伤事例	(15)
2.1.3 东南亚战争中美军飞机战伤事例	(16)
2.2 飞机事故损伤事例	(18)
2.2.1 飞机烧伤事例	(18)
2.2.2 飞机地面撞伤事例	(22)
2.2.3 飞机部件断裂与裂纹损伤事例	(25)
2.2.4 飞机部件腐蚀事例	(31)
2.2.5 其他事故损伤事例	(33)
第3章 飞机战伤理论分析	(38)
3.1 飞机遭打击损伤形状分析	(38)
3.1.1 侵彻破坏的六种基本形式	(38)
3.1.2 影响侵彻破坏形状的基本因素	(40)
3.2 飞机遭打击损伤面积大小分析	(42)
3.2.1 试验分析	(42)
3.2.2 计算公式	(43)
3.3 飞机遭打击损伤分布分析	(43)
3.4 飞机遭打击损伤深度分析	(44)
3.4.1 理论分析	(44)
3.4.2 飞机构件打击损伤计算模型	(46)

第4章 飞机通用战伤模式	(53)
4.1 飞机战伤基本形式	(53)
4.1.1 切槽	(53)
4.1.2 脱落	(53)
4.1.3 性能改变	(54)
4.1.4 窝坑	(54)
4.1.5 破孔	(54)
4.1.6 变形	(55)
4.1.7 裂缝	(56)
4.1.8 表面伤	(56)
4.1.9 烧伤	(56)
4.1.10 折断	(58)
4.1.11 缺口	(58)
4.1.12 磨损	(58)
4.1.13 连接松动	(59)
4.1.14 卡滞	(60)
4.1.15 断路	(60)
4.1.16 短路	(60)
4.1.17 接触不良	(61)
4.1.18 生物损伤	(62)
4.1.19 软损伤	(62)
4.2 飞机组合损伤	(62)
4.2.1 基本形式损伤的组合损伤	(63)
4.2.2 同一部件多处损伤	(63)
4.2.3 多个部件同种损伤	(64)
4.3 不同武器打击的战伤模式	(65)
4.3.1 常规武器损伤	(65)
4.3.2 新概念武器损伤	(66)
4.3.3 核武器损伤	(72)
4.4 飞机宏观战伤模式	(73)
第5章 飞机典型材料与结构战伤模式	(75)
5.1 飞机典型材料的战伤模式	(75)
5.1.1 金属材料战伤模式	(75)
5.1.2 复合材料战伤模式	(80)
5.1.3 座舱有机玻璃损伤模式	(86)
5.2 飞机典型结构的战伤模式	(87)
5.2.1 各种武器打击造成的战伤模式	(87)
5.2.2 地面撞击造成的损伤模式	(99)
5.2.3 操纵过猛损伤模式	(100)

第 6 章 飞机发动机、系统附件和电气系统战伤模式	(101)
6.1 飞机复合型战伤模式	(101)
6.2 发动机战伤模式	(102)
6.3 系统附件和电气系统战伤模式	(102)
6.3.1 不同威胁因素作用下的损伤模式	(102)
6.3.2 系统附件战伤模式	(105)
6.3.3 电气系统的战伤模式	(105)
第 7 章 飞机损伤影响分析	(108)
7.1 损伤类型及等级的划分	(108)
7.2 损伤影响分析方法	(109)
7.2.1 确定飞机执行任务的基本功能	(109)
7.2.2 确定完成基本功能的重要部件	(109)
7.2.3 分析损伤的影响	(110)
7.3 飞机不同结构区、部件损伤影响分析	(112)
7.3.1 不同飞机结构区损伤影响分析	(112)
7.3.2 不同类型构件损伤影响分析	(113)
附录 A	(116)
参考文献	(130)

第 1 章 飞机威胁机理与打击试验

飞机战伤即飞机战场损伤,包括空中战斗损伤、地面遭受打击造成的损伤以及战时装备本身的随机故障、耗损故障、意外故障和人为差错造成的损伤等。战斗损伤主要是指飞机遭受受到敌方导弹、航炮、炸弹或激光、核辐射、电磁脉冲等直接或间接作用造成的损伤、破坏。

飞机战伤模式是指飞机损伤造成飞机各种结构、材料、部件损坏的表现形式,如变形、裂纹、缺口、断裂、破孔、卡死、烧伤、炸伤和击穿等。飞机战伤机理是指飞机战伤的形成原理,其内容包括飞机威胁机理、飞机打击试验、飞机典型战伤与事故损伤事例分析和飞机战伤形成分析等。

为了了解飞机战伤形成的原因,本章研究飞机的威胁机理和打击破坏试验。

1.1 飞机的威胁机理

在战场环境下,由于敌方行动引起武器系统损坏的所有可能条件及其组合称为威胁机理。它是导致武器装备损坏的根本原因。

在分析威胁机理时,需要考虑三方面的因素:一是敌方攻击的因素,包括攻击的武器(常规武器、核武器、生物武器、化学武器、新概念武器或其他武器)、攻击的来源(空中、地面、海中,见图 1-1)、攻击的方向(正面、后面、侧面、上面、下面)、攻击的时机(飞行中、地面停放);二是飞机自身的因素,包括飞机的生存性和使用状况(如压气机或涡轮叶片断裂飞出、燃烧室壳体击穿火焰窜出等);三是自然环境,包括沙尘、风暴、雷电等。



(a) 从空中攻击



(b) 从地面攻击

图 1-1 攻击的来源

可见,威胁机理有直接的,如爆炸性射弹、穿甲弹、弹片、爆炸波、热辐射、核辐射、激光、微波、电磁脉冲等直接作用;也有间接的,如操纵过猛、地面撞击、环境作用等。飞机在战争中由于敌方的直接威胁作用而引起的损伤容易理解,但往往对间接威胁作用而引起

的损伤容易忽略，常见的有以下几种。

飞机操纵过猛引起的损伤：包括飞机退出俯冲、拉起、低空超规定表速飞行时，过载超过了设计允许使用过载，其承力构件发生的变形、蒙皮发生的皱折和拉伸变形等损伤。

飞机被撞击引起的损伤：包括飞机在已被破坏的跑道上着陆、滑行或燃料耗尽场外迫降而引起的撞伤；机库、洞库等设施被破坏而砸伤飞机或飞机地面活动与其他飞机、车辆或设施相撞引起的损伤；起飞、着陆时，地面沙石、空中飞鸟等外来物引起的撞伤等。

环境作用引起的损伤：因构件与环境或大气发生化学、物理和（或）生物作用而引起的损伤，包括金属的一般腐蚀和应力腐蚀，以及非金属材料的退化等。化学和核战争、海洋环境以及大气中有污染物质的工业区容易引起的环境损伤。

在前面提到的敌方攻击、飞机自身因素和自然环境三方面的威胁因素中，造成飞机战伤的主要因素是敌方的攻击。在过去战争中，主要有炮弹、炸弹和枪弹等的攻击。在现代战争中，主要是导弹的攻击。此外，还有新概念武器和其他武器的攻击。

下面主要研究常规导弹、航炮和飞机自身因素对飞机的威胁机理，其他攻击武器对飞机的威胁将结合飞机战伤模式一并阐述。

1.1.1 导弹杀伤战斗部对飞机的威胁机理

导弹是指载有战斗部，依靠自身动力装置推进，由制导系统导引、控制其飞行轨迹，并导向目标的飞行器（见图1-2）。中国台湾装备的主要空空、地空导弹的性能参数见表1-1。

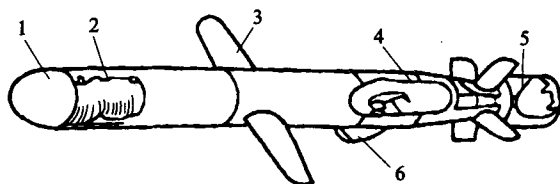


图1-2 导弹

1—制导系统；2—战斗部；3—弹翼；4—涡轮风扇发动机；
5—固体火箭助推器；6—发动机进气口

导弹之所以成为武器，是因为载有战斗部。战斗部是导弹上直接毁伤目标，完成其战斗任务的部分。战斗部一般由下列几部分组成。

壳体：战斗部装填物的容器，同时也是连接战斗部其他零部件的基体。对于破片杀伤战斗部，壳体在炸药爆炸作用下碎裂成破片，成为杀伤元素。如果战斗部位于导弹头部，壳体还保证头部具有良好的空气动力外形。

引信：适时引爆战斗部的装置。这里所指的适时引爆有三种情况，第一种是战斗部碰击目标瞬时引爆。如去打装有装甲目标的聚能破甲战斗部，一触即发能使战斗部在尚未发生跳飞和变形情况下就生成了金属射流把装甲穿透。第二种是战斗部碰击目标后经过延时引爆。如破坏地下建筑物和工事等目标的爆破战斗部，让战斗部钻入一定深度后才引爆炸药，其破坏作用能更好地发挥。第三种是战斗部在离目标适当高度或距离时引爆。如直接命中空中飞机目标的可能性较小，因此，只要求战斗部在到达它的有效杀伤距离范围内引爆炸药就行。第一种和第二种情况都是战斗部碰触目标后引信才能起引爆作用，因而称为触发式引信。第三种

表 1-1 中国台湾装备的主要空、地空导弹

序号	名称	型号	类别	战斗部类型	战斗部重量/kg	制导方式	射程/km	速度/Ma	生产厂商
1	响尾蛇	AIM-9J	空空	破片式	4.76	被动红外寻的	14.5	2.5	美国海军武器中心
		AIM-9L	空空	连续杆、离散杆(新)	2.74	被动红外寻的	18.53	2.5	美国海军武器中心
		AIM-9B	空空	连续杆式	2.74	被动红外寻的	11	2.5	美国海军武器中心
2	天剑	天剑 I	空空	破片式	11	红外线制导	10~15	2.5	中国台湾中山科学院
		天剑 II	空空	破片式	30	主动雷达寻的	30~40	2.5	中国台湾中山科学院
3	魔术-II	魔术-II	空空	破片式	12.5	红外导引头	0.5~10	3	法国马特拉公司
4	米卡	MICA	空空	高能炸药	12	惯导+主动雷达	0.5~60	—	法国马特拉公司
5	先进中距	AIM-120C	空空	破片式	20	惯性+指令+雷达	65~75	5.6	美国雷神公司
6	马特拉	超 330D	空空	破片式	250(弹重)	雷达制导	16~18	—	法国
7	麻雀	AIM-7E	空空	高能炸药	29.5	半主动雷达	0.6~26	3.5	美国
8	天弓	天弓 I	地空	破片式	90	红外线+雷达寻的	60~80	3.5	中国台湾中山科学院
		天弓 II	地空	破片式	90	惯性制导和雷达寻的	70~150	4	中国台湾中山科学院
9	爱国者	MIM-104	地空	高爆/破片	91	无线电指令+半主动	80~100	5~6	美国雷西昂公司
10	奈基 II	MIM-14	地空	—	545	无线电指令	140	3.3	美国
11	霍克	MIM-23A	地空	破片式	45	半主动雷达寻的	1.8~46	2.3	美国
		MIM-23B	地空	连续杆式	75	半主动雷达寻的	1.5~41	2.8	美国
12	小榭树	MIM-72C	地空	破片式	11.35	光学瞄准+红外寻的	0.5~6	2.5	美国
		RIM-72A	舰空	破片式	11.35	光学瞄准+红外寻的	0.5~6	2.5	美国
13	麻雀	MIM-7F	地空	连续杆式	30	半主动雷达跟踪寻的	10~22	3.5	美国
14	西北风	MISTRAL	地空	破片式	21.4	红外引导	6	2.6	法国
15	毒刺	FIM-92A	地空	破片式	1	光学瞄准+红外	0.3~5	2.2	美国通用电力公司
16	复仇者	—	地空	破片式	10.12	光学或红外	0.2~5.6	2.2	美国
17	标准 SM1	RIM-66A	舰空	破片式	61	半主动雷达	18~24	2	美国通用电力公司

情况的战斗部无须碰触目标引信就能起引爆作用,因而称为非触发式引信。作为上面三种情况以外的一种补充情况,是在导弹未能杀伤和破坏目标而脱靶之后,经过一定时间,引信能自动引爆战斗部让导弹自毁。为了使引信有自毁作用,引信里装有定时机械、电子钟表机构或药盘装置。为了保证战斗部在运输、储存、操作和飞行过程中保险,在引信里还装设有安全保险机构。

传爆系列:能量放大器。其作用是把目标给予的起始能量转变为爆炸波或火焰,并把这种起始能量逐级放大而引爆战斗部里的炸药。传爆系列由火工品(雷管或火帽)、主传爆药柱、辅助传爆药柱和扩爆药柱等组成。火工品和主传爆药柱一般都装设在引信里面,成为引信的一个组件。

装填物:破坏目标的能源和工质。装填物主要有炸药和核装料,它们的作用是将本身储藏的能量(化学能或核能)通过反应(化学反应或核反应)释放出来,形成破坏各种目标的因素。载有普通炸药战斗部的导弹称为常规导弹;载有核装料战斗部的导弹称为核导弹。由于在现代战争中,要对付的目标的多样性,因而战斗部的种类远不只这两种,其详细分类如图1-3所示。其中,对飞机的主要威胁是杀伤战斗部。

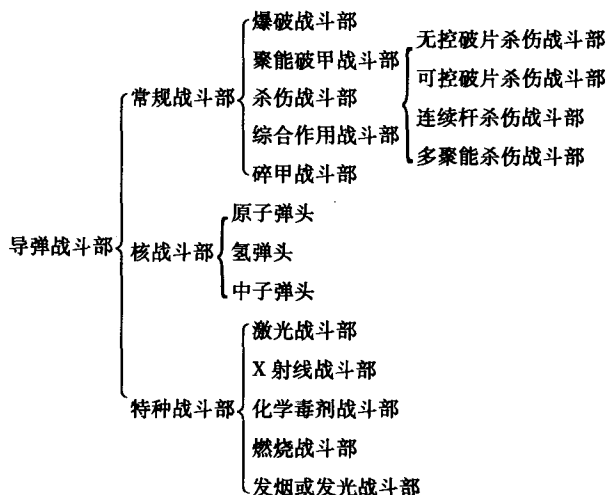


图1-3 战斗部分类

导弹命中目标或飞达目标附近,引信引爆炸药,主要依靠炸药爆炸时产生的爆轰波压力和高速飞散的金属破片的冲击作用杀伤和破坏目标,这样的战斗部称为杀伤战斗部。

根据引信的设计,战斗部一般有两种威胁方式:一是直接撞击杀伤目标;二是在目标附近爆炸杀伤目标。战斗部爆炸后,产生的杀伤元素包括爆轰波和弹片,在直接撞击和近距离爆炸时,爆轰波破坏力极大;在较远距离爆炸时,爆轰波威力迅速衰减(见图1-4),弹片成为主要的杀伤元素。为了能使战斗部获得较多的有效杀伤破片,目前导弹上大量应用的是可控破片的杀伤战斗部,被称为可控式结构杀伤战斗部。由于采取控制破片的方式不同,其结构形式和破片的形成也各不相同。

1.1.1.1 破片式战斗部的威胁机理

为了使战斗部爆炸后能形成大量形状特殊的高速金属破片,并且这些破片有最佳的传播性能,能杀伤和破坏空中目标,破片式战斗部被设计成半预制破片式和预制破片式两种。设

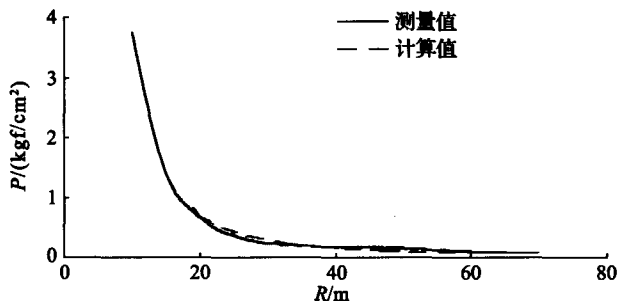


图 1-4 250kg 级炸弹冲击波超压分布

计这些战斗部有两个基本要求：一是破片的有效性，即能有效击穿或破坏空中飞行目标，需确定最有效破片的重量^①、形状、尺寸和材料；二是破片分布的最佳性，要正确处理较大尺寸和最大毁伤能力与较小尺寸和最多破片数二者间的协调问题。

(1) 半预制破片式战斗部的威胁机理

该战斗部分为壳体刻槽式、装药表面刻槽式和圆环叠加点焊式三种。

a. 壳体刻槽式杀伤战斗部是应用应力集中和剪应力原理，在战斗部壳体内壁或外壁刻上许多斜向交错的沟槽，当炸药爆炸时，由于刻槽处比较薄弱，壳体沿刻槽处破裂成有规则的、合乎需要的破片。破片的大小、形状和数量由预制沟槽的多少和位置来控制。实践和理论证明，菱形槽的效果优于方格槽。为了保证在炸药爆炸作用下沿槽破裂，一般让槽深为壁厚的三分之一。图 1-5 所示为一种地空导弹内壁刻槽的杀伤战斗部，炸药爆炸后可获得数千块破片。

b. 装药表面刻槽式杀伤战斗部是在炸药装药表面刻许多凹槽，当炸药爆炸时，在凹槽处产生聚能效应作用，将壳体切割成预计的破片。采用这种结构能很好地控制破片的形状和尺寸，没有连片的现象。

图 1-6 所示是用在空空导弹上这种结构形式的战斗部。它是在紧贴壳体壁放置一个压制有许多 U 形聚能槽的塑料套，当浇铸炸药后，就在炸药表面形成了相应的 U 形聚能槽。炸药是混合炸药，其中梯恩梯占 40%，黑索金占 40%，铝粉占 20%，石蜡占 5%。

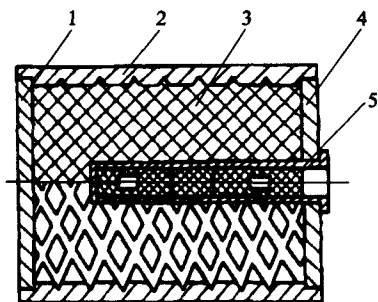


图 1-5 壳体内壁刻槽的杀伤战斗部

1—底；2—内壁刻槽壳体；3—梯/黑混合炸药；4—盖；5—传爆管和药柱

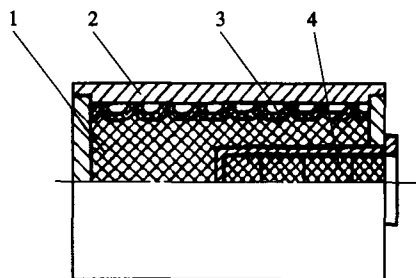


图 1-6 U 形聚能槽的杀伤战斗部

1—炸药；2—壳体；3—带聚能槽的塑料套；4—传爆药柱

^① 本书中的“重量”均是“质量”概念，单位为 kg、g 等。

c. 圆环叠加点焊式杀伤战斗部是用许多圆环叠加点焊组成壳体, 每个圆环之间由三个焊点焊接起来, 焊点彼此错开排成螺旋线, 这样可使破片均匀分布。由于圆环的宽度相同, 拉断也较一致, 因此破片的一致性较好。图 1-7 所示是空空导弹上用的此种结构形式的杀伤战斗部。它由 52 个圆环重叠两层点焊组成壳体, 外形呈腰鼓形。战斗部从中间起爆, 大约生成 2600 个破片, 每个破片重 6g 左右, 能穿透 4mm 厚的钢板, 破片的静止飞散角在 50° 左右, 杀伤半径 25 ~ 30m。

(2) 预制破片式战斗部的威胁机理

该战斗部是把事先制造好的破片和炸药装填在战斗部的薄壳空腔里。根据所要求的破片数和飞散要求, 破片分成一层、两层或多层形式, 用树脂粘结起来。预制破片形状有圆柱形、半圆柱形、方形和球形。预制破片形状选择主要考虑破片弹道性能好、易于加工、内腔装填量大、破片间隙小而且便于连接等因素。多层结构中采用方形的多, 一层结构中采用方形、球形、圆柱形或半圆柱形皆有。预制破片的飞散初速比整体式或半预制破片式的破片飞散初速要低 15% ~ 30% (在装填系数相同情况下)。图 1-8 所示是一种六方形预制破片式杀伤战斗部。

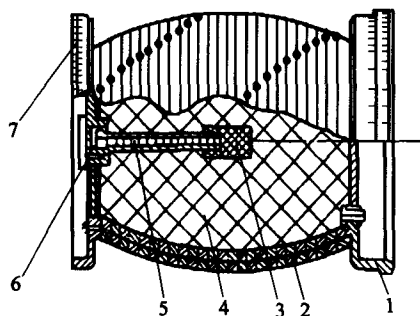


图 1-7 圆环叠加点焊式杀伤战斗部

1—后法兰盘；2—壳体（52 个圆环）；3—传爆药柱；
4—炸药；5—传爆管；6—垫片

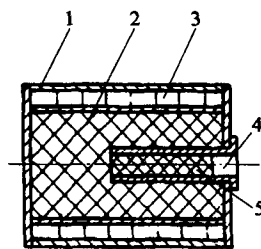


图 1-8 六方形预制破片式杀伤战斗部

1—壳体；2—炸药；3—预制破片；4—安装
引信的空腔；5—传爆管和药柱；7—前法兰盘

1.1.1.2 连续杆式战斗部的威胁机理

该战斗部是利用双层方形钢杆条沿两端部交错焊接起来, 并收拢而形成圆筒外壳的一种战斗部。当炸药爆炸时, 在爆炸生成物的作用下, 壳体沿四周扩张形成一个圆形的环, 如图 1-9 所示。当环扩张到最大直径之后, 若继续拉长便被断裂成一根根的钢杆条。因为钢杆条的初速较高 (如法国马特拉空空导弹战斗部为 1.2km/s), 再加上导弹与飞机的相对速度, 当它碰到目标时, 无论是连续钢杆条还是断裂后的钢杆条, 就好像钢刀一样能把飞机的机身、机翼切穿。由于这种“剪切效应”, 故这种战斗部又称为“切割式”战斗部。

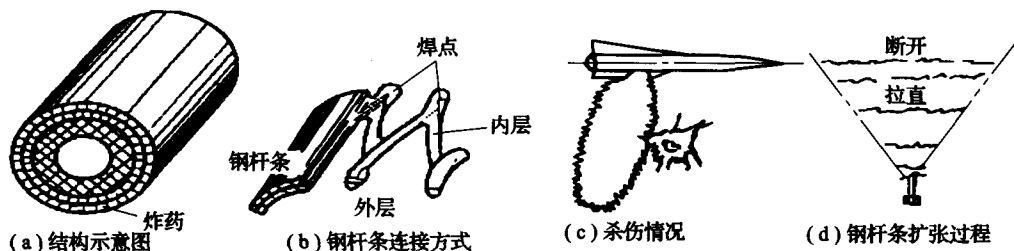


图 1-9 连续杆式杀伤战斗部

美国的“麻雀”Ⅲa战斗部就是这种战斗部。它的外壳圆筒由0.6mm厚的10号钢板卷制对焊而成，内壳由4.8mm×4.8mm×256mm的钢杆条226根组成。内壳又分内外层并且各层有钢杆条113根。内层的钢杆条顺轴排列，外层的钢杆条与轴倾斜一个角度，外层钢杆条首尾两端与内层钢杆条首尾两端左旋相错一根，依次排列成两层滚焊而成，从而构成铰链式连接，以便在爆炸载荷作用下能扩张成环状。钢杆条为25号钢，这些钢杆条相当于破片战斗部的壳体并构成炸药容器，爆炸后能形成连续杆条。炸药装药采用由底部注装，成分由梯恩梯、黑索金、铝粉和地蜡等组成。装药密度1.7~1.74g/cm³，重量6.58kg。战斗部全重29.94kg，杆条张开初始速度1.5~1.6km/s，有效杀伤半径12~15m。连续杆式战斗部适用于装在制导精度较高的导弹上，能有效地摧毁飞机。

1.1.1.3 离散杆式战斗部的威胁机理

该战斗部的内部结构与连续杆式战斗部基本相同，主要区别是钢杆条两端未被焊接起来，战斗部爆炸后，各杆条飞出好似一把把钢刀，能把机身、机翼等飞机部件切穿。

上述三种导弹战斗部的威胁特性见表1-2，导弹战斗部爆炸的破片场如图1-10、图1-11所示。

表 1-2 导弹战斗部的威胁特性

战斗部类型	破片类型	破片速度/m·s ⁻¹	杀伤方式	特 点	应 用
破片式	小尺寸破片 30~5000粒	1800~2400	毁伤飞行员、燃料箱、发动机等	破片散布范围较大，引战配合容易	天弓、天剑、“魔术-II”等
连续杆式	连续杆件	1200~1600	切割目标表面及结构件	破片速度低，对高速目标杀伤能力差，杀伤面窄	MIM-23B、小槲树等
离散杆式	离散杆件	1800~2400	切割目标结构件	破片速度高，适用于攻击高速目标	AIM-120等

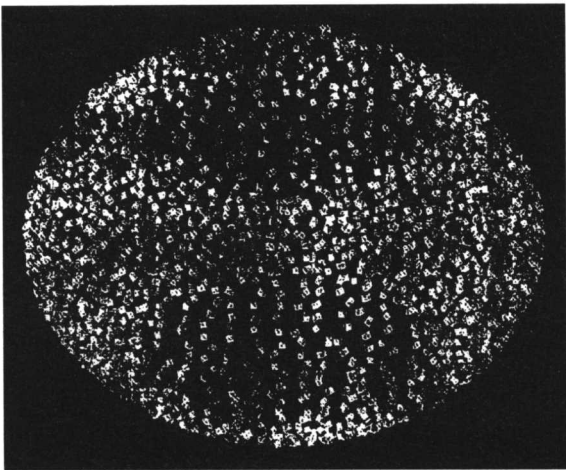


图 1-10 某导弹战斗部爆炸 0.2ms 时的破片场

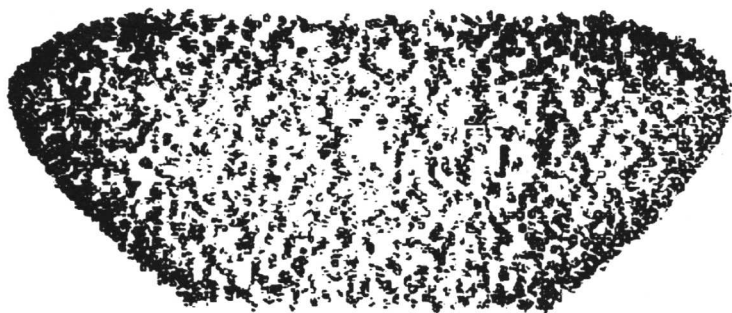


图 1-11 某导弹战斗部爆炸 0.08ms 时的破片场

1.1.1.4 破片式定向战斗部的威胁机理

轴对称的破片式战斗部，爆炸后破片在空中成轴对称分布，因而对飞机目标有破坏作用的破片利用率低，约为总破片数的 8.3% ~ 12.5%。破片式定向战斗部的引信能敏感目标位于导弹的哪一侧，并将破片直接导向目标，即把战斗部的能量集中到攻击目标上去，从而提高毁伤效率。据报道，定向战斗部的技术方法有：偏心起爆法、两次起爆法、改变战斗部形状法和自定向抛掷法。美国的 AIM-120、俄罗斯的 P-77 和以色列的“怪蛇”4 等空空导弹就装有这种战斗部。

AIM-120 先进中程空空导弹的破片定向战斗部呈圆柱形，位于弹体中部，内装高能炸药、198 根独立的杆状破片、主动雷达引信及其 4 根天线、1 个触发引信以及安全解除保险与点火装置，总重量为 22kg。其主动雷达近炸引信能敏感目标位于导弹的哪一侧，并将破片直接导向目标，而不是分布在一个环形范围内。弹载计算机利用导引头获得目标距离和接近距离等信息，计算出最佳引爆延期时间，传输给引信，从而引爆战斗部装药，以获得最佳杀伤效果。

P-77 空空导弹破片定向战斗部内装高能炸药，配有主动激光近炸引信，总重量 22kg。由于激光的波束窄和方向性好，引信具有较强的抗杂波干扰能力。引信舱内部装有激光发射机、接收机、信号处理器和电源等设备，外部均匀分布有 8 个激光引信窗口，相互间隔 45°。这种结构布置可以保证不管目标在什么方位，主动激光引信都能在导弹与目标交汇的瞬间，精确地控制爆炸点，及时地引爆战斗部。

“怪蛇”4 空空导弹破片定向战斗部的破片组合体由 5000 枚钢球和树脂黏结在一起组成，每枚钢球重量为 2g，直径为 8mm。破片飞散方位角为 0°，在距离爆炸中心 10 ~ 15m 处，破片分布密度大于 5 枚/m²，可穿透 10m 处 6mm 厚的 A3 钢板。该战斗部用主动激光近炸引信起爆，引信的作用距离为 10 ~ 15m，具有极强的抗干扰能力，引爆精度高，且虚报警率低。其破片定向战斗部与主动激光近炸引信相结合，使导弹具有全向攻击目标的能力，同机载火控系统头盔瞄准具配合，具有 -90° ~ +90° 离轴发射能力。

目前，现役空空导弹中绝大多数是采用破片式杀伤战斗部，其次为连续杆式杀伤战斗部和离散杆式杀伤战斗部，少数为破片式定向杀伤战斗部。

1.1.2 防空火炮对飞机的威胁机理

防空火炮以发射炮弹来攻击空中目标。在海上和陆上，防空火炮通常扮演着最终防御角

色,对攻击4km范围内小角度、低加速度目标最有效;对1km内的目标,防空火炮的打击是致命的。国外航炮、机枪与航空火箭的战术性能见附录。

防空火炮能弥补大多数制导导弹在其最小射程内和对付低空目标命中率不高的缺点,且价格比面空导弹低,在需最终防御的区域内,其布置可以比制导导弹密集得多。在一定战场环境下,火炮与导弹结合可使防御效率最大,而耗费降至最少。

据资料统计,飞机被敌方火炮和航炮打击造成损伤的基本规律是:弹着点最多的部位是左、右机翼第14肋以内,后机身在21框以后及尾翼与各舵面上;弹着点破孔直径多数在150mm以下,其中以30~45mm直径最多;蒙皮椭圆形弹孔,长径约在300mm以下,短径约为50mm左右;穿甲弹进弹孔直径在50mm以下,出口直径约在30~45mm;飞机主要结构的战伤,多数在机翼前、后大梁及斜梁腹板上,后部机身多在斜向加强框和垂直安定面主梁等处。

1.1.3 在外部因素影响下飞机自身的威胁机理

(1) 在外部因素影响下军械系统的威胁机理

当飞机的炮弹、炸弹、火箭弹和导弹等被击中后,可能发生的主要后果是:在弹舱内燃烧并导致装载的弹药自燃或爆炸。

(2) 在外部因素影响下燃油系统的威胁机理

a. 油箱燃烧和爆炸。高温弹片击穿油箱可引起油气混合物起火,或从受损的油箱内溢出的燃油被引燃也可导致油箱燃烧或爆炸。其后果是火势会迅速蔓延到飞机其他部位,可对相邻的结构和子系统造成严重的损伤。

b. 液体动力冲击。当穿透物或碎片穿过油箱液体时,在内部液体中产生强大的冲击波,使油箱壁或油箱内的部件损伤,即为液体动力冲击损伤。液体冲击波可使油箱壁产生大裂缝和破孔,导致大量燃油泄漏。

(3) 在外部因素影响下发动机的威胁机理

a. 燃烧室火焰窜出。弹片、断裂的发动机叶片等穿透燃烧室壳体,使火焰窜出壳体,烧坏相邻部件和引起可燃物燃烧。

b. 二次打击损伤。弹片或受损结构的碎片等异物进入发动机进气道,造成压气机或涡轮叶片损伤,断裂的叶片可穿出发动机壳体,导致其他部件损伤。

c. 连带破坏损伤。例如,进气道损伤、变形使进气道流场畸变,或紧靠进气道的燃油管破裂,燃油流入进气道被发动机吸入,引起压缩机喘振,使压缩机叶片等损坏;滑油枯竭导致轴承故障等。

1.2 飞机地面破坏打击试验

为了解导弹战斗部杀伤飞机的真实情况,第二次世界大战以来,美军的许多试验场,如阿伯丁试验场、海军试验场、海军装备试验站等,对实际飞机或部件进行过大量的破坏试验。

1.2.1 飞机地面外爆炸破坏试验

国外在飞机外爆炸试验中,目标飞机通常是被支撑或悬吊在一定高度的空中。炸药

一般被固定在离开地面钢板 1m 左右的上空, 借以评价爆炸波对目标的破坏效应。在某些试验中, 目标飞机还反向旋转或机尾朝下悬吊起来, 以获得各种不同的装药与目标的方位。

在试验分析过程中, 常以装药量乘 2 来考虑地面反射对爆炸波的加强作用。考虑到爆炸坑内的能量散失效应, 视具体试验条件, 其值可降为 1.8。这就是说, 100kg 装药在地面上爆炸的破坏作用与无反射作用时海平面条件下的 180kg 装药爆炸等效。

将试验中测得的数据, 绘制出打击目标的若干平面的等值破坏线, 并以高能炸药装药量来标识每条等值线。如果以所标重量的装药在等值线的任一点上爆炸 (海平面条件, 无反射作用), 就会使目标遭受规定等级的破坏。

图 1-12 和图 1-13 所示是美国弹道研究所, 根据试验结果绘制的外爆炸等值破坏曲线。该曲线是在以下条件得出的。

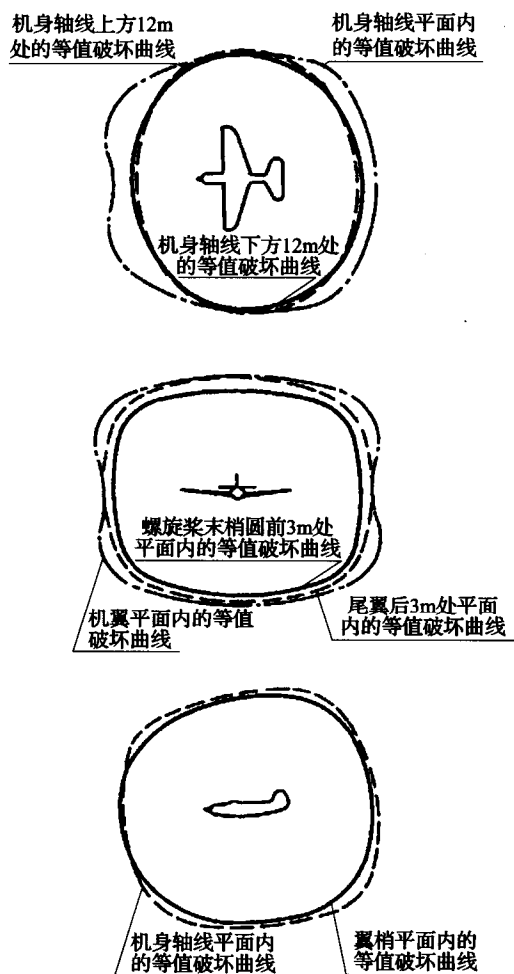


图 1-12 204kg 球形彭托利特炸药使 A-25 飞机遭受 100-A 型结构性破坏的海平面等值破坏曲线 (计算结果)

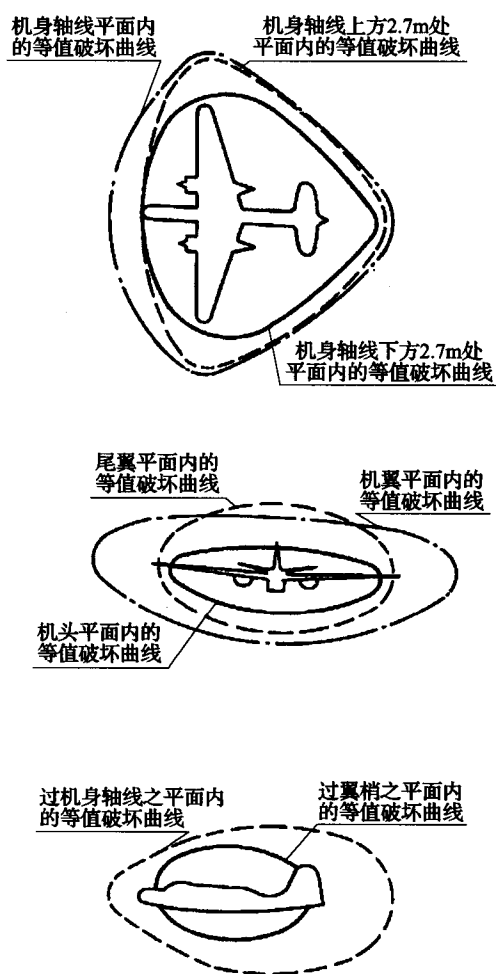


图 1-13 41kg 球形彭托利特炸药使 A-20 飞机遭受 100-A 型结构性破坏的海平面等值破坏曲线 (计算结果)