

文章编号: 2097-1974(2024)05-0099-08

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240514

典型作战飞机目标等效靶分层次设计方法研究

刘伟¹, 李国杰¹, 张健¹, 张炜¹, 张梦涛²

(1. 北京航天长征飞行器研究所, 北京, 100076; 2. 西北工业大学航空学院, 西安, 710072)

摘要: 飞机是高价值军事目标, 毁伤研究难以直接针对真机开展, 设计等效靶代替真实目标开展毁伤试验和仿真研究是目标易损性和毁伤评估研究的重要手段。提出了依据不同等效对象毁伤特性和使用需求的分层次等效靶设计方法, 重点关注破片毁伤元作用下飞机部件/分系统的“物理与功能”毁伤等效技术, 在此基础上综合考虑目标内外环境等效以及加工、运输等多方面的因素, 建立了飞机目标毁伤等效靶的详细设计流程。然后根据提出的方法, 针对预警机雷达天线罩进行了等效靶设计, 并加工试验件, 开展了地面静爆毁伤试验测试, 结合试验结果验证仿真方法的准确性后, 通过冲击有限元仿真确定了典型破片打击雷达天线罩不同区域的弹道极限速度和相应的临界穿透能量阈值, 验证了所提等效靶设计方法的合理性和可用性。提出的等效靶设计方法可为防空武器弹药毁伤能力检验评估、飞机目标毁伤标准制定以及联合作战演训活动提供支撑。

关键词: 等效靶设计; 毁伤评估; 作战飞机; 易损性; 功能毁伤等效

中图分类号: TJ410

文献标识码: A

Research on Hierarchical Design Method of Equivalent Target for Typical Combat Aircraft

LIU Wei¹, LI Guojie¹, ZHANG Jian¹, ZHANG Wei¹, ZHANG Mengtao²

(1. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing, 100076;

2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

Abstract: As a high-value military target, it is difficult to directly conduct damage research on real aircraft. Designing equivalent targets to replace real targets in damage tests and simulation research are important means for target vulnerability and damage. A target design method is proposed based on the damage characteristics and usage requirements of equivalent objects, with a focus on the "physical and functional" damage equivalent technology of aircraft components/subsystems under the threat of fragments. On this basis, a detailed design process for equivalent targets of aircraft is established by comprehensively considering the equivalence of the target's internal and external environment, as well as various factors such as processing and transportation. Then, based on the proposed method, an equivalent design target is carried out for the radar antenna cover of the early-warning-aircraft (EWA), and ground static explosion damage tests are carried out on the equivalent components. After verifying the accuracy of the simulation method with the test results, the ballistic limit velocity and corresponding critical penetration energy thresholds of different areas for the typical fragment hitting radar antenna cover are determined through impact finite element simulation, the rationality and usability of the proposed equivalent target design method is verified. The equivalent target design method proposed can provide support for the inspection and evaluation of the damage ability of air defense weapons and ammunition, the formulation of aircraft target damage standards, and joint combat training activities.

Keywords: equivalent target design; damage assess; combat aircraft; vulnerability; functional damage equivalence

0 引言

实弹打击试验和模型分析是进行目标易损性和毁伤评估研究不可或缺的两种方法^[1-4]。两种方法都要对特定的弹靶系统进行等效。对于飞机类高价值军事目标, 由于外军飞机难以获取、试验条件和成本有限及其它客观因素的影响, 工程研究过程中处处使用真

实飞机或系统进行试验是不现实的, 所以等效靶常常被采用。等效靶将真实目标特征中对最后输出结果有影响的变量进行适当的组合, 在研究的过程中将主要因素凸显出来, 在实现研究目标的前提下达到了对研究对象进行简化的目的。

为验证毁伤判据模型、修正评估软件、获取毁伤

效应数据、支撑高效毁伤评估,各国开展了大量目标/部件毁伤特性试验,主要以物理等效靶试验为主,着重于弹药的毁伤威力,并对目标的功能毁伤也开展了初步的研究。

1971年,美军正式提出了作战试验的概念,根据试验中的被打击对象类型可以划分为真实目标毁伤试验和目标等效靶毁伤试验^[5]。2016年,联合作战评估小组(Joint Combat Assessment Team, JCAT)等联合进行了针对F-16飞机的实弹终端效应试验,试验设置了不同的弹头类型/尺寸和交战条件^[6]。除了全尺寸试验外,为确定部件的毁伤判据,国外也已经开展了一些部件级等效靶的相关理论和试验研究。例如Bourget等^[7]提出用多层金属薄板作为后等效靶进行乘员的毁伤评估;Held^[8]则研究了部件在金属射流作用下的均质钢靶等效问题;美空军推进实验室开展了大量飞机油箱非核易损性试验研究,试验通过设计弹丸/破片打击下的油箱功能毁伤等效靶进行实弹试验研究,包含了油箱干舱引燃试验、油气空间引燃试验、油箱惰化影响试验以及不同燃油介质的对比试验等^[9];美国陆军航空发展局和波音公司合作开展了飞机复合材料结构的毁伤特性研究,并对功能毁伤(结构受损后的剩余强度)进行了分析;相关机构开展了破片冲击下的NEPE推进剂冲击起爆毁伤等效靶设计与试验研究^[10]。

在目标/部件毁伤等效靶设计与试验方面,中国的高校及相关科研单位也开展了材料等效方法、部件物理等效靶设计试验、多部件组合等效靶设计试验等方面的研究。曹兵^[11]研究了靶板的等效方法和原则,指出对于侵彻等效来讲,应保证等效靶与原靶板抵抗同一破片侵彻的能力相同。柯源等^[12]针对坦克发动机在爆炸成型弹丸作用下的毁伤效应问题,进行了结构等效靶设计和侵彻毁伤试验。唐昌州等^[13]针对人员等效问题,研究了LY-12硬铝与III级软体防弹衣加25 mm厚红松靶之间的等效关系。针对破片打击油箱^[14]、战斗部等功能毁伤过程较为明确的部件,中国相关单位已

经开展了初步的功能毁伤等效靶试验研究。但目前中国目标毁伤等效靶研究仍主要集中在目标的物理毁伤等效方面,在功能毁伤方面,分析方法还未达成共识。

综上,目前针对飞机等高价值军事目标的毁伤评估试验主要是通过全尺寸实物目标或设计目标毁伤等效靶的方式开展研究。等效靶研究中,主要考虑目标结构的物理毁伤特性的等效,并对目标的功能毁伤(例如剩余强度)开展了初步的探索。此外,目前等效靶设计方面还存在置信度不高、通用性不强等问题。为了实现防空武器弹药毁伤能力检验评估的目标、制定空中目标毁伤标准以及满足联合作战重大演训活动的毁伤靶标需求,开展目标毁伤等效靶设计方法研究,形成相应的设计方法规范。

本文针对飞机类目标部件/分系统提出了等效靶多层次设计方法和设计流程,并以某外军预警机雷达天线罩为例,开展了等效靶设计、等效靶毁伤试验和等效靶仿真分析研究,验证了所提出方法的合理性。

1 飞机目标等效靶设计分类方法

根据研究对象的尺度不同,飞机等效靶通常可以划分为构件级(壁板、梁等)、部件/分系统级(发动机、座舱系统等)和整机级。构件级等效靶主要考虑物理毁伤等效,相关等效方法研究较成熟;整机级等效靶试验开展相对较少,而针对部件/分系统级等效靶的研究需求较多。因此本文重点针对飞机部件/分系统级等效靶设计方法开展研究,所提出的方法也可拓展应用至整机级等效靶设计。

1.1 飞机部件/分系统毁伤特性分类

等效靶设计需要综合考虑目标的几何特征、物理特性、功能特性、毁伤特性、环境等多方面因素。飞机作为一个复杂系统,其部件/分系统类型众多,不同类型部件/分系统的各方面特性也存在差异,因此首先对部件/分系统按照物理与功能毁伤的耦合关系进行分类,然后提出相关的等效靶设计方法,如表1所示。

表1 飞机部件/分系统毁伤特性分类

Tab.1 Classification of aircraft parts/subsystem damage characteristics

类型	物理-功能毁伤特征	等效研究思路	适用部件/分系统(举例)
I	物理毁伤、功能毁伤耦合度小,但组成部件功能较为独立,例如,座舱内部的操纵、显示等组件功能相互独立。	系统内部组件单独进行等效研究;按物理毁伤与功能毁伤两阶段进行等效研究;建立物理到功能的映射关系。	雷达天线罩;航电设备。
II	物理毁伤、功能毁伤耦合度小,组成部件功能相关性大。	采用整体分析进行等效研究;按物理毁伤与功能毁伤两阶段进行等效研究;建立物理到功能的映射关系。	翼面结构,受力由整体结构共同承担。
III	物理毁伤、功能毁伤强耦合,物理毁伤与功能毁伤较难区分。	等效靶设计不按物理毁伤与功能毁伤分阶段研究,而是作为整体进行等效。	机载弹药;油箱。

1.2 等效靶层次划分与设计思路

部件/分系统在毁伤元作用下的毁伤过程可以划分为多个层次，各层次分别对应等效靶设计中的不同等效程度，如图1所示。结合所研究部件/分系统特性、试验条件、周期成本等多方面因素，选择可行且最合适的等效靶设计方法。

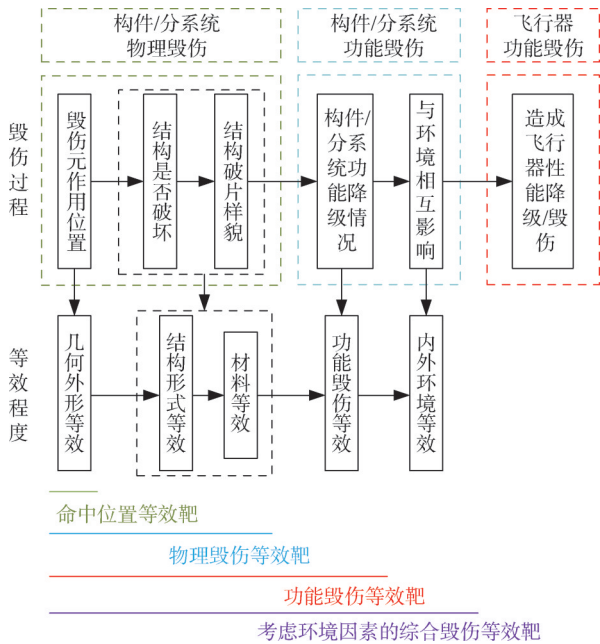


图1 毁伤机理及等效靶设计层次划分

Fig.1 Damage mechanism and equivalent target design hierarchy

针对以上层次划分，本研究提出飞机目标分层次等效靶设计思路，如图2所示。即依据不同的使用目的设计不同复杂度的等效靶。底层的等效靶设计较为容易，例如命中位置等效靶只考虑几何因素即可，成本较低；层级越高，设计越复杂、考虑因素越多，成本越高。

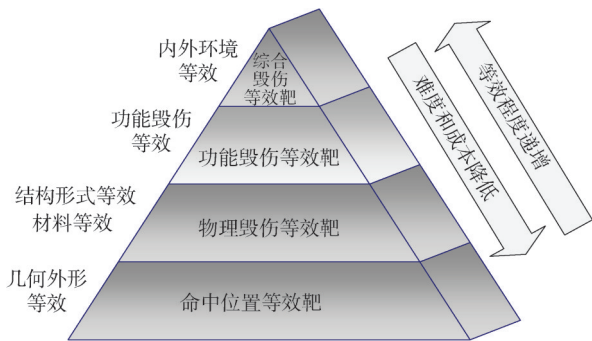


图2 分层次等效靶设计思路

Fig.2 Pyramid thinking of equivalent target design

图2中底层向顶层是递进关系，具体说明如下：

a) 命中位置等效靶：只对目标的几何外形进行

等效，通过试验获取毁伤元对目标的命中情况的位置分布信息，通常适用于需要以低成本大量开展或目标信息极少的毁伤试验。

b) 物理毁伤等效靶：除了对目标几何外形进行等效外，还需要对目标的结构形式和结构材料进行毁伤特性等效，通过试验进一步获取目标的物理毁伤信息（如破片穿透情况、穿孔尺寸等），通常适用于目标部件或分系统功能毁伤特性较为复杂、难以进行等效靶设计的情况。

c) 功能毁伤等效靶：在物理毁伤等效的基础上，考虑目标部件、分系统在毁伤元作用下的功能降级和毁伤等效设计，通过试验进一步获取目标的功能毁伤信息（如结构剩余强度等），通常适用于目标部件、分系统的功能毁伤特性较为明确的情况。

d) 考虑环境因素的综合毁伤等效靶：在物理和功能毁伤等效的基础上，考虑目标部件、分系统与系统内外部环境的相互影响关系进行等效靶设计，通过毁伤试验进一步获取目标毁伤与内外环境的相互影响结果（如翼面的气动载荷等），通常适用于目标部件或分系统的毁伤与环境之间具有明显耦合关系的情况。

2 等效靶设计流程与方法

在提出的等效靶层次划分与设计思路基础上，本节从原始模型构建-等效靶设计-试验件设计加工3个阶段建立了等效靶的详细设计流程，并重点说明了物理毁伤等效和功能毁伤等效的方法。

2.1 等效靶设计流程

面向毁伤评估与等效靶设计需求，针对典型毁伤元，本文提出了针对不同类型部件/分系统、对目标特性不同程度进行等效的设计流程与方法。在物理特性等效方面，忽略次要特征，抓住主要矛盾，采用密度-强度比折算、弹道极限修正等方法从几何、材料等方面进行等效，主要目的是模拟部件的防护能力。在功能特性等效方面，通过构建多层靶与部件多个毁伤状态的关联模型，实现功能毁伤的模拟。综合物理毁伤和功能毁伤两个方面，形成典型毁伤元作用下基于目标易损性的等效准则，考虑等效靶的工作环境，研究内部遮挡关系、内外部载荷环境的等效设计。

在等效设计的基础上，确定影响等效靶加工、试验的其他因素，包括靶标的结构完整性、加工连接方式、运输限制、测试接口、成本等。考虑运输及组装因素，对靶标进行分解，提出分离面设计与结构强度、系统质量等校核方法，便于拆分和集成，最终形

成面向毁伤试验的等效靶试验件综合设计流程与方法,如图3所示。

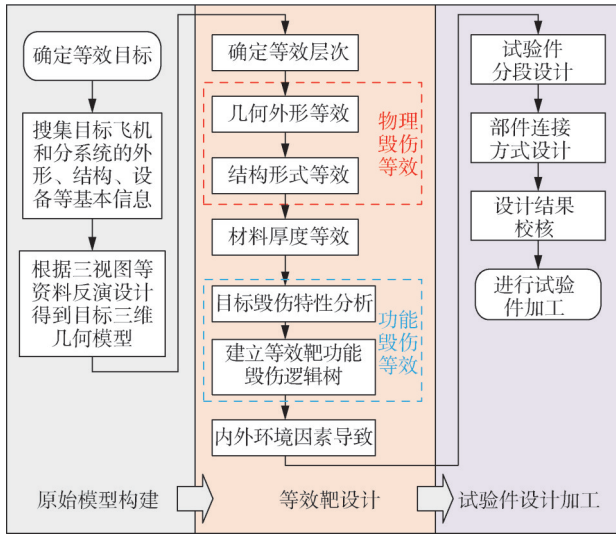


图3 等效靶试验件设计流程

Fig.3 Equivalent target test piece design process

2.2 物理毁伤等效设计方法

飞机部件/分系统物理毁伤等效的原则应遵循:几何外形一致或接近,迎弹面积相同,抗毁伤能力与原部件相同。在等效处理时,需要对目标部件所使用的不同材料、不同厚度进行等效计算。作为初始的近似,采用密度-强度比折算与加权平均厚度相结合的方法进行确定。采用强度和密度比折算的等效靶厚度计算方法如式(1)所示^[15]:

$$h_0 = h \left[\frac{\sigma_{b0} \rho_{b0}}{\sigma_b \rho_b} \right]^{2/3} \quad (1)$$

式中 σ_{b0} 为部件本体材料强度; σ_b 为等效靶材料强度; ρ_{b0} 为部件本体材料密度; ρ_b 为标准等效板材料的密度; h_0 为部件本体厚度; h 为等效靶厚度。等效厚度也可根据飞机设计人员的工程经验进行确定或调整。

如遇到部件自身厚度不同,但所使用材料一致的情况,在建立等效靶时,厚度可用加权平均法进行等效,如式(2)所示:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^M h_i s_i}{\sum_{i=1}^M s_i} \quad (2)$$

式中 h_i 和 s_i 分别为第 i 个单元的厚度和面积; M 为组成部件单元的数量。

对于破片毁伤元,利用侵彻固体和液体材料的能量衰减、速度衰减模型(弹道极限方程),对前述基于密度-强度比折算算法构建的等效模型进行验证与修

正。修正可采用经验公式或有限元冲击仿真方法进行。修正的准则为:侵彻体贯彻部件和贯穿多层等效靶的弹道极限、剩余速度等基本相同。若两者结果相差较大,则对等效靶的厚度进行修正,直到精度满足要求为止,如图4所示。

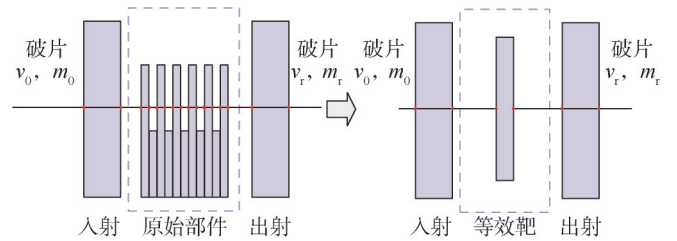


图4 多层靶等效示意

Fig.4 Schematic diagram of multi-layer target equivalence

采用 THOR 侵彻方程^[16]计算,可得到侵彻体侵彻固体材料的剩余速度,如式(3)所示:

$$v_r = v_0 - 10^c (hA)^a m_r^b (\sec\theta)^d v_0^e \quad (3)$$

式中 v_0 , v_r 分别为破片初速度和剩余速度; m_r 为破片着靶时的质量; θ 为破片弹道射线与命中三角面元法向矢量的夹角; c, a, b, d, e 为与目标相关的材料参数。

2.3 功能毁伤等效设计方法

等效靶的功能毁伤特性等效主要考虑的是功能毁伤模式的等效。在目标易损性分析与毁伤评估过程中,部件/分系统的每个具体功能毁伤等效是通过赋予等效靶各个部分功能毁伤状态属性来实现的^[17]。飞机类目标各主要部件/分系统的典型毁伤模式如表2所示。

表2 飞机主要部件/分系统毁伤模式

Tab.2 Damage modes of aircraft main components/subsystems

系统名称	典型毁伤模式	
外形结构	变形	穿孔
动力系统	进气道穿透	尾喷管或加力
	气流紊乱	燃烧室损伤
	发动机失效	发动机起火
	风扇穿透损伤	润滑油丧失
	燃烧室穿透损伤	发动机控制和附件失效
燃油系统	涡轮损伤	
	燃油供给耗尽	空腔起火
飞行控制系统	燃油引燃/引爆	
	电子设备失能	液压失效
	控制管路损伤	电力失效
机载武器	控制动力丧失	作动器损伤
		液压油泄漏
人员	失效	引爆
其余系统	失能	丧生
	机械/结构压溃	电源损伤
	润滑油丧失	设备穿透损伤

通过分析毁伤等级-功能毁伤模式-对应部件-部件毁伤准则之间的相互映射关系，参考毁伤树的模型形式，采用与门AND、或门OR表示同级单元之间的冗余关系，完成等效靶功能毁伤逻辑树的建立，如图5所示。根据建立的等效靶功能毁伤逻辑树，对照试验后等效靶的物理毁伤状态参数与所建立毁伤判据，便可确定等效靶的功能毁伤状况。

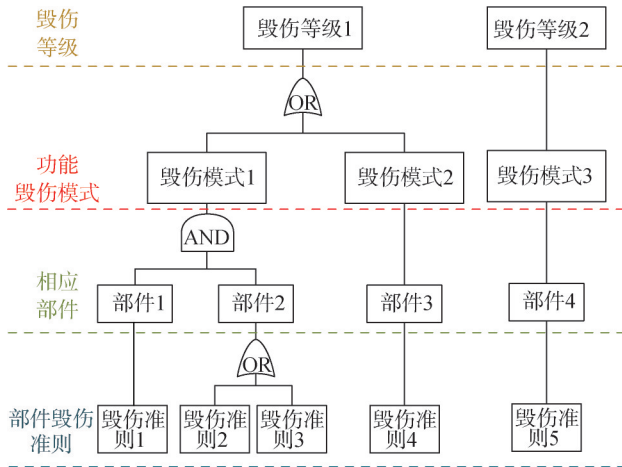


图5 等效靶功能毁伤逻辑树

Fig.5 Functional damage logic tree of equivalent target

3 案例-预警机雷达罩等效靶研究

以典型战斗部破片打击外军预警机雷达天线罩为例，采用上述等效靶设计方法完成了等效靶的设计，分别开展了等效靶地面毁伤试验和数值仿真分析。

3.1 预警机雷达天线罩等效靶设计

3.1.1 毁伤特性分析与等效区域选取

该预警机椭圆形截面雷达天线罩直径为9.14 m，中心点最大厚度为1.83 m。天线罩内有两部背靠背排列布置的雷达，不停地旋转以实现全空域的360°扫描。雷达天线罩分为外侧的两个天线罩和中间的铝合金构造部分，两个天线罩内部主要布置了机载雷达的天线。在中央的铝合金构造部分，安装了天线用的各种设备和转轴。

雷达罩的主要毁伤模式包括：a) 天线阵面损伤；b) 信号发射/接收机失效；c) 天线罩受损影响滤波性能；d) 结构或机构受损等。本研究中雷达罩等效靶设计主要考虑毁伤模式a、b、c的等效。

由于雷达天线罩的结构形式和内部部件分布具有对称性，而整个雷达罩尺寸太大，整体设计加工等效靶试验件难度较大、成本较高，会增加运输、存放和使用的难度，因此选取能够包含雷达罩典型物理功能

特征的一部分（如图6所示）进行等效靶设计（包含外侧天线罩部分（黑色）、中央铝合金蒙皮部分（白色）、内部典型结构、雷达天线阵面以及内部系统。

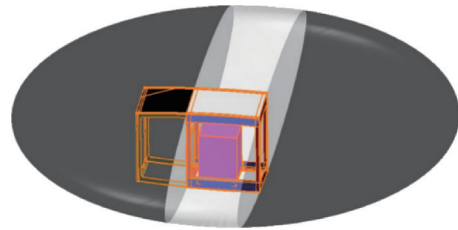


图6 雷达天线罩等效区域选取

Fig.6 Selection of equivalent area for radar radome

3.1.2 物理毁伤等效

参照结构剖视图和相关资料，雷达罩等效靶内部结构为框-桁结构，中央铝合金构造部分结构为主要承力结构，天线罩部分结构为辅助支撑结构，如图7所示。所有的框均采用腹板+筋条+缘条组成形式，桁条均采用腹板+缘条形式。

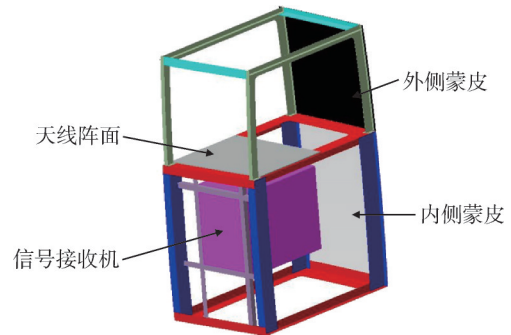


图7 雷达罩等效靶结构形式

Fig.7 Equivalent target structure of radome

雷达天线罩蒙皮分为两部分，中央铝合金构造区蒙皮仅起到承载作用，真实材料为2024-T3铝合金，因此等效靶的内段蒙皮采用真实的3 mm厚2024-T3铝合金，无须等效。而两侧天线罩蒙皮要满足介电性能，材料为双层E玻璃纤维增强环氧树脂材料包夹Nomex蜂窝结构。根据相关资料，通常雷达天线罩透波蒙皮总厚度约为13.2 mm，其中上、下表面各约0.6 mm，蜂窝夹层高度约12 mm，蜂窝壁面厚度约为1 mm。根据蜂窝夹层蒙皮的结构形式，假设破片以不同打击角度穿透天线罩蒙皮时平均穿过上、下表面+2层蜂窝壁面，采用强度等效原则将等效靶外侧蒙皮等效为3 mm的2024-T3铝合金，如式（4）所示：

$$h = \left(\frac{1870\text{kg/m}^3 \times 570\text{MPa}}{2710\text{kg/m}^3 \times 420\text{MPa}} \right)^{2/3} \times (0.6\text{mm} \times 2 + 2\text{mm}) = 3.06\text{mm} \approx 3\text{mm} \quad (4)$$

对于破片毁伤来说，命中天线阵的基板不会造成毁伤，只有直接命中辐射元才能造成毁伤，该型雷达天线阵面的辐射元-移相器为波导管结构，中心是一个比较脆弱的铁氧体，由于铁氧体的尺寸非常小，所以只考虑波导管的结构毁伤，波导管的结构强度大致相当于2A12铝合金，所以通常将天线阵面等效为10 mm的2A12铝板^[15]。

由于结构承载不是雷达天线罩的主要功能，因此为便于加工连接，雷达罩等效靶内部结构材料采用45号钢。内部结构尺寸根据相关资料和工程经验进行选取。

雷达罩内部的系统部件主要是信号发射/接收机，根据典型机载设备的结构特点，将雷达信号接收机等效为2 mm的2A12铝合金箱体。

最终，雷达天线罩等效靶的尺寸约为2.54 m×1.08 m×1.79 m，质量约183.4 kg。

3.1.3 功能毁伤等效

根据本文提出的等效靶功能毁伤等效分析设计方法，对雷达天线罩进行了主要功能分析、毁伤等级与毁伤模式分析、部件组成与功能映射分析、部件毁伤准则分析等，最终建立的雷达罩等效靶功能毁伤逻辑树如图8所示。

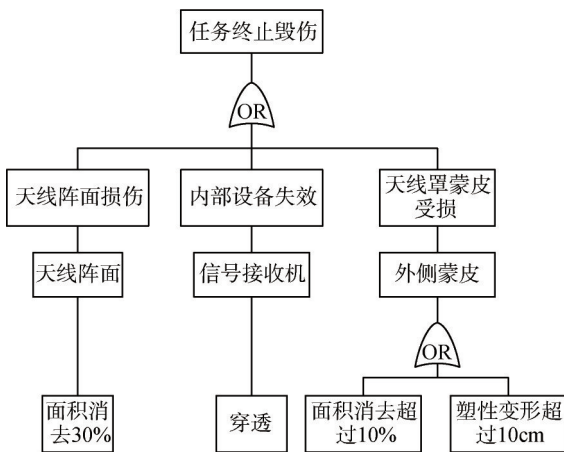


图8 雷达罩等效靶功能毁伤逻辑树

Fig.8 Functional damage logic tree of radome equivalent target

预警机雷达罩属于任务功能系统，其受损失效主要影响预警机执行作战任务的能力，不会直接造成飞机损耗。

3.2 预警机雷达罩等效靶毁伤试验

根据上述雷达罩等效靶设计结果进行等效靶试验件加工，雷达罩等效靶内部结构之间通过焊接连接，

蒙皮通过铆钉连接在内部结构上，如图9所示。此外，在试验件的侧面和上面增加2 mm钢板用于隔绝试验中冲击波的影响。



图9 雷达罩等效靶实物

Fig.9 Physical photo of equivalent target of radome

通过搭载典型破片战斗部的地面静爆试验完成对雷达罩等效靶的破片毁伤试验，试验现场布置照片如图10所示。试验中，雷达罩等效靶布置在距爆心水平7 m处。



图10 等效靶毁伤试验现场布置

Fig.10 Layout of equivalent target damage test site

静爆试验后，雷达罩等效靶的各个部分均有破片穿孔，分析穿孔位置可知，部分破片先后穿透等效靶的多层部件，如先后穿透外侧蒙皮-天线阵面-内部设备入射面-内部设备出射面。观察不同部件上的穿孔形貌发现，破片命中蒙皮时速度较高，因此蒙皮上的穿孔附近无明显塑性变形，而由于前端部件的遮挡，破片命中内部设备时的速度较小，因此内部设备的穿孔附近存在显著塑性变形。等效靶毁伤样貌如图11所示。



图11 雷达罩等效靶毁伤试验结果

Fig.11 Results of equivalent target damage test for radome

雷达罩等效靶各部件上的破片穿孔数量如表3所示。

表3 等效靶破片穿孔数统计结果

Tab.3 Statistical results of equivalent target fragment perforation count

部件名	破片穿孔数/个
外侧蒙皮	8
内侧蒙皮	30
天线阵面	3
内部设备	22

3.3 预警机雷达罩等效靶毁伤仿真

基于Ls-dyna显式动力学仿真软件对战斗部破片冲击雷达罩等效靶的动态响应进行仿真分析。建立的雷达罩等效靶仿真模型如图12所示。所有部件均采用四边形shell单元进行建模，共划分了12 976个单元，采用Johnson-Cook材料本构描述材料的动态力学性能，通过关键字*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE实现仿真过程中的接触检测，模型边界条件为底部节点固支。

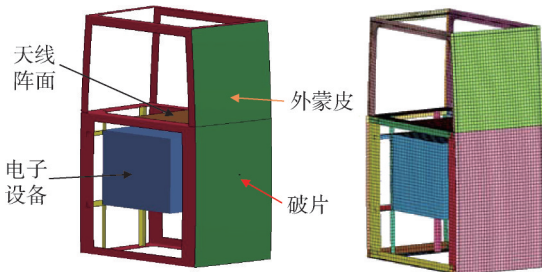
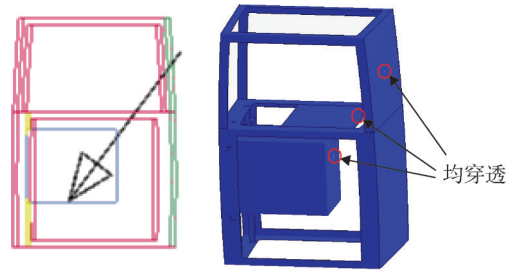


图12 雷达罩等效靶有限元模型

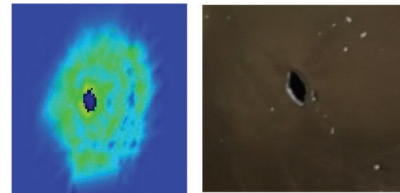
Fig 12 FEM of radome equivalent target

首先根据试验中的破片类型、破片速度和典型打击位置进行仿真复现，如图13所示。对比试验和仿

真中的破片穿孔形貌，验证数值仿真的准确性。



a) 仿真工况设置



b) 结果对比

图13 仿真与试验结果对比

Fig 13 Comparison of simulation and test results

通过对比可知，仿真得到的雷达罩等效靶在破片打击下各部件的穿透情况和穿孔样貌与试验结果一致性较好。在此基础上，通过有限元仿真典型Φ8 mm钨合金球状破片以不同速度打击雷达罩等效靶不同区域的工况，确定破片穿透等效靶的弹道极限速度V50和相应的临界穿透能量阈值Elimit。由分析可知，常规防空导弹战斗部破片均可以对该预警机雷达罩内部的天线阵面和电子设备造成损伤。

4 结 论

本研究得出以下结论：

a) 本文综合考虑目标物理毁伤和功能毁伤等效，提出了飞机类目标的等效靶分层次设计方法和设计流程。

b) 以典型战斗部破片打击外军预警机雷达天线罩为例，采用上述等效靶设计方法完成了等效靶的设计，并分别开展了等效靶地面毁伤试验和数值仿真分析。确定了典型破片穿透雷达罩等效靶不同区域的弹道极限速度和相应的临界穿透能量阈值。同时也验证了本文等效靶设计方法的合理性和可用性。

参 考 文 献

[1] 裴扬, 宋笔锋, 石帅. 飞机作战生存力分析方法研究进展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 216-234.
 PEI Yang, SONG Bifeng, SHI Shuai. Analysis method of aircraft combat survivability: progress and challenge[J]. Acta Aeronautica et

- Astronautica Sinica, 2016, 37 (1): 216-234.
- [2] 肖海, 刘新学, 李亚雄, 等. 复杂目标毁伤效果评估关键问题分析[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(12): 5-8.
XIAO Hai, LIU Xinxue, LI Yaxiong, et al. Key problems of complex targets damage effect assessment[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(12): 5-8.
- [3] 魏庆栋, 王忠, 江光德, 等. 导弹打击目标的毁伤效果评估方法研究综述[J]. 战术导弹技术, 2023(3): 76-88.
WEI Qingdong, WANG Zhong, JIANG Guangde, et al. Review on damage effect evaluation method of missile attacking target[J]. Tactical Missile Technology, 2023(3): 76-88.
- [4] 徐豫新, 蔡子雷, 吴巍, 等. 弹药毁伤效能评估技术研究现状与发展趋势[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(6): 569-578.
XU Yuxin, CAI Zilei, WU Wei, et al. Research status and development trend of ammunition damage effectiveness evaluation technology[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 41(6): 569-578.
- [5] 陈荣, 卿华, 任柯融, 等. 美军飞机易损性实弹测试现状及启示[J]. 国防科技, 2021, 42(2): 36-42.
CHEN Rong, QING Hua, REN Kerong, et al. Progress on live fire tests and assessment of aircraft vulnerability in the US armed forces [J]. National Defense Technology, 2021, 42(2): 36-42.
- [6] HAWKINS J, SPINK R, MONAHAN C, et al. Joint Live Fire (JLF) final report for instrumentation for local accelerative loading[R]. AD-1020616, 2016.
- [7] BOURGET D, BAILLARGEON Y, NORTHROP S. Witness pack calibration for human vulnerability assessment[C]. Florida: 20th International Symposium on Ballistics(II), 2002.
- [8] HELD M. Shaped charge steel equivalent[J]. Aircraft Survivability, 2020(1): 25-32.
- [9] CLODFELTER R G, OTT E E. Preliminary investigation of fuel tank ullage reactions during horizontal gunfire[R]. AD-755361, 1972.
- [10] ANN S H, MICHAEL B D. Derivation of conditional kill probabilities for propellant-filled cartridge cases subject to fragment attack[R]. AD-A054327, 1978.
- [11] 曹兵. 靶板等效方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2003, 23(S4): 122-123.
CAO Bing. Study on equivalent target experimental methods[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2003, 23(S4): 122-123.
- [12] 柯源, 刘彦, 黄风雷. 不同着角下爆炸成形弹丸对坦克发动机等效靶的毁伤效应[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(2): 130-136.
KE Yuan, LIU Yan, HUANG Fenglei. The damage effect of the equivalent target of the tank engine under EFP oblique penetration [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 41(2): 130-136.
- [13] 唐昌州, 智小琦, 徐锦波, 等. 小钨球对防弹衣加松木靶的侵彻研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5): 155-163.
TANG Changzhou, ZHI Xiaoqi, XU Jinbo, et al. Study on penetration of small tungsten ball into armor and pine target[J]. Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(5): 155-163.
- [14] 骆亮, 裴扬, 侯鹏, 等. 飞机燃油箱油气空间引燃概率函数预测模型[J]. 兵工学报, 2022, 43(2): 383-390.
LUO Liang, PEI Yang, HOU Peng, et al. Prediction model for ignition probability function of ullage in aircraft fuel tank[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(2): 383-390.
- [15] 李磊, 石全, 李兵, 等. 钨球破片撞击指控装备毁伤效应研究[J]. 现代防御技术, 2021, 42(6): 52-58.
LI Lei, SHI Quan, LI Bing, et al. Research on damage effect of tungsten ball fragment impact command and control equipment[J]. Modern Defence Technology, 2021, 42(6): 52-58.
- [16] 周理, 史健, 张清博, 等. 相控阵天线物理和功能毁伤评估方法研究[J]. 现代防御技术, 2021, 49(4): 56-63.
ZHOU Li, SHI Jian, ZHANG Qingbo, et al. Research on physical and functional damage assessment of phased array antenna[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(4): 56-63.
- [17] 徐志方, 薛建锋, 刘涛, 等. 含能破片战斗部对导弹目标的等效毁伤效应研究[J]. 南京理工大学学报, 2020, 44(3): 348-353.
XU Zhi-fang, XUE Jian-feng, LIU Tao, et al. Equivalent damage study of missile due to energetic fragment warhead[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(3): 348-353.

作者简介

- 刘伟 (1994—), 男, 工程师, 主要研究方向为目标易损性与毁伤评估。
- 李国杰 (1979—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为战斗部毁伤与评估技术。
- 张健 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为目标易损性与毁伤评估。
- 张炜 (1996—), 女, 工程师, 主要研究方向为目标易损性与毁伤评估。
- 张梦涛 (1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空中目标易损性。