# 作战飞机关键结构易损性评估方法 研究进展与展望



# 刘小川,张宇

中国飞机强度研究所结构冲击动力学航空科技重点实验室,陕西西安 710065

**摘 要:**作战生存力是作战飞机的关键设计指标,分为敏感性和易损性两大研究领域。易损性侧重研究飞机被毁伤威胁命 中之后的毁伤特性,常用的度量指标为命中条件下的杀伤概率或易损面积。结构平台是作战飞机功能的载体,结构易损性 是飞机易损性的基础,设计规范对结构易损性提出了明确的要求,试验和数值方法是结构易损性评估的主要手段。本文介 绍了飞机结构易损性研究的流程,梳理了相关设计规范的要求和研究体系,归类了主要的毁伤威胁和杀伤模式,给出了结构 易损性建模与关键结构确定方法,梳理了易损性评价准则和评估方法。总结了燃油箱和操纵面等关键结构在典型毁伤效应 作用下的易损性评估方法,以及多毁伤效应耦合作用下的易损性评估方法。结合先进航空结构技术和新质毁伤技术的发 展,对结构易损性评估方法的发展方向和重点进行了展望。

关键词:作战飞机;生存力;易损性;关键结构;评估方法

#### 中图分类号:TB122 文献标识码:A

1991年的海湾战争中,以美军为首的联军凭借技术装备的领先,对伊拉克军队进行了长达38天的空中打击,导致伊拉克一线部队损失超过50%。1999年的科索沃战争中,以美国为首的北约军队通过78天的空中打击,在几乎未动用地面力量的情况下,迫使南联盟接受了停火协议。新的战争形态推动军事理论不断发展,新的作战模式和作战概念在持续涌现,但夺取制空权、保持空中优势始终是一流军队建设的重点。

作战飞机是空中作战的核心装备,其出勤率和战损率 对战争胜负具有重要的影响。一战期间,飞机以辅助作战 力量的姿态出现,主要关注飞机的飞行高度、速度和航程等 性能指标,几乎没考虑生存力问题。二战期间,空军开始作 为独立的军种和关键作战力量出现,大规模的空中作战导 致数以千计的飞机被击落,飞机开始采用自卫航炮武器、油 箱防爆、电子对抗等生存力措施。越战期间,随着航空技术 和武器技术的快速发展,地空对抗和空中对抗的烈度大幅 提升,美军在战争期间损失了多达5000架的飞机,开始将 飞机的作战生存力作为军用飞机的关键设计指标,并从设

#### DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.12.005

计规范和试验设施等多个维度构建生存力保障体系。

飞机作战生存力(airplane combat survivability ACS)定 义为"飞行器躲避或承受人为敌对环境的能力",一般分为 敏感性和易损性两大领域。敏感性侧重研究探测、跟踪、识 别、火力或武器控制、制导、引信起爆、命中等一系列事件, 以飞机被威胁命中的可能性(命中概率)来度量。易损性侧 重研究飞机被终端武器命中之后的毁伤特性,常用的度量 指标为命中条件下的杀伤概率或易损面积。生存力与战斗 力之间是指数型的对应关系,例如,沙漠风暴行动的作战数 据分析显示,若飞机生存力从98%提高到99%,则剩余飞机 的数量将从36%提高到60%(51次出动)<sup>[1-2]</sup>。

$$P_{s} = 1 - P_{H} \cdot P_{K/H}$$
 (1)  
式中: $P_{s}$ 为飞机生存力; $P_{H}$ 为飞机敏感性; $P_{K/H}$ 为飞机易  
损性。

结构是作战飞机实现功能的载体,结构易损性是作战 飞机易损性研究的重点,包括毁伤效应的分类、关键易损结 构的确定、易损性建模的方法、易损性评价准则等关键技 术<sup>[3]</sup>。早期的结构易损性研究主要是通过实战结果的总结

收稿日期: 2021-07-25; 退修日期: 2021-09-06; 录用日期: 2021-10-15

引用格式: Liu Xiaochuan, Zhang Yu. Research progress and prospects of vulnerability assessment methods for key structures of combat aircraft[J].Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12):43-56. 刘小川,张宇. 作战飞机关键结构易损性评估方法研究进展与 展望[J].航空科学技术, 2021, 32(12):43-56.

或实弹试验数据进行的,随着计算力学的发展,数值手段已成为结构易损性研究的主要手段<sup>[4]</sup>。

结构易损性评估的一般过程是<sup>[5-6]</sup>:基于毁伤树等方 法,建立飞机整体结构易损性模型,获得飞机受损的概率及 其对应毁伤等级;选取关键结构,建立等效结构模型,获得 结构在典型毁伤源作用下的毁伤效应;对关键结构进行抗 毁伤优化设计,降低结构的毁伤概率和失效风险。

本文介绍了相关作战飞机结构易损性设计规范的要求,归类了主要的毁伤威胁和杀伤模式,给出结构易损性建 模与关键结构确定方法,梳理易损性评价准则和评估方法, 总结燃油箱和操纵面等关键结构在典型毁伤效应作用下的 易损性评估方法,并对结构易损性评估方法的发展方向和 重点进行展望。

# 1 作战飞机结构易损性评估规范

在作战生存力方面,美国颁布了系列军用指南与规范,如 MLT-STD-2069《飞机非核生存力大纲要求》、MLT-STD-2089《飞机非核生存力术语》、MLT-HDBK-268(AS)《提高飞机对常规武器威胁的生存力的设计和评估指南》、AR70-75《人员及装备生存力》和JSSG《联合军种规范指南》等,并依据规范开发了系列评估软件。为支撑相关规范,美国建立了多军种生存力分析中心,并建成了21个国家级靶场和试验基地。美军飞机易损性主要研究机构见表1。美国海军生存力试验系统如图1所示。

在JSSG《联合军种规范指南》中,根据作战任务等对飞

表1 美军飞机易损性主要研究机构[7]

Table1 Main research institute of aircraft vulnerability of the U.S. military<sup>[7]</sup>

军种	机构名称	地点
陆军	陆军研究实验室、生存力/ 杀伤力分析委员会、空战所	马里兰州阿伯丁试验场
空军	空军研究实验室、飞机生存 力研究所	俄亥俄州莱特·帕特森 空军基地
海军	海军空中作战中心、武器生 存力实验室	加利福尼亚中国湖

机易损性设计的需求,将易损性指标分解到各个子系统,给 出各个子系统的易损性要求,经过子系统易损性的设计和 验证,进而实现飞机整体易损性指标,体现了系统工程的思 想,并将易损性研究划分为三个层级,如图2所示。

第一层级JSSG—2000《航空器系统》主要从军方的作战 使用角度提出飞机生存力要求指标的要求。要求满足"任 务、场景、背景、任务阶段和使用条件规定的任务生存力概 率"。即任务生存力、一对一生存力、停放飞机生存力和地面 保障生存力。在任务生存力和一对一生存力中,主要考虑飞 机的任务类型、任务阶段、损毁级别和生存概率等。第二层 级JSSG—2001A《航空器》主要体现对于飞机平台本身的生 存力要求,是对JSSG—2000的细化。第三层级则进一步细 化,针对具体的结构/系统,提出具体的生存力设计需求。

# 2 结构易损性的建模与评估方法

### 2.1 毁伤机理与毁伤效应

飞机典型作战场景下,可能面临的毁伤源包括对空导 弹、航炮、高射炮、空地导弹、航空炸弹等常规武器毁伤源和 各种激光、电磁脉冲等新型武器毁伤源。在各类毁伤源作 用下,飞机结构毁伤机理主要分为以下4种<sup>[3]</sup>:(1)机械性毁 伤,如穿孔、变形、折断等;(2)激活性毁伤,如燃油箱结构的 爆炸等;(3)燃烧性毁伤,如燃油的燃烧等;(4)电磁性毁伤, 如核爆等对飞机电子元器件的影响等。

毀伤机理的多样性决定了结构毁伤模式的多样性,如 燃油箱结构可能有穿孔变形、燃爆等毁伤模式。结构的毁 伤模式是由毁伤源和结构自身特性共同决定的,不同的毁 伤源可能引起不同的毁伤模式;相同的毁伤源,不同的结构 特性也可能引起不同的毁伤模式。毁伤模式决定了毁伤效 应。结构的毁伤效应表现为自身功能的丧失或由它引起的 其他结构的功能丧失。根据毁伤模式的不同,可将毁伤效 应分为三类<sup>[9]</sup>:(1) 非爆炸性外来物撞击毁伤。非爆炸性外 来物撞击毁伤主要包括射弹、导弹(远距离爆炸)、动能武器 和其他方式。(2) 爆炸性外来物毁伤。爆炸性外来物毁伤 主要包括各类高能爆炸弹、爆炸性射弹,与飞机结构接触后



图1 美海军生存力试验系统<sup>[7]</sup> Fig.1 US Navy survivability experiment system<sup>[7]</sup>



Fig.2 JSSG research system<sup>[8]</sup>

或近距离发生爆炸,产生冲击波和密集破片。(3)各种新型 毁伤。主要包括高能激光武器毁伤、电磁脉冲武器毁伤、粒 子束武器毁伤等。

#### 2.2 关键易损结构的确定

燃油箱结构、发动机结构以及舵面结构等是飞机的主要易损结构,按照典型结构/系统对飞机整体易损性的贡献 大小,排序见表2。

Table 2         Aircraft vulnerability structure/system sequencing		
排序	结构/系统名称	典型损伤模式
1	燃油结构/系统	燃油泄漏、燃烧、爆炸毁伤、水
		锤效应等
2	推进(指发动机)结构/系统	吸入异物、结构穿孔、故障等
3	飞控结构/系统	控制动力丧失、操纵面和铰链
		受损等
4	动力线路和螺旋桨叶/螺旋	滑油损失、桨叶等机械结构损
	桨结构/系统	伤等
5	乘员系统	人员损伤导致飞机失控
6	结构系统	结构丧失、压力过载、结构穿
		透等
7	电气系统	电缆切断、电气部件受损等
8	军械结构/系统	航空武器(炸弹等)受损
9	航空电子系统	穿透物、碎片、冲击波、辐射等
		毁伤

表2 飞机易损性结构/系统排序<sup>[1]</sup>

#### 2.3 结构易损性建模方法

针对飞机易损结构的简化建模,可根据研究层级将其 划分为两个层级。

第一个层级是针对飞机整体结构的易损性评估。一般 将飞机划分成不同的舱段结构,包括驾驶员舱段、电传系统 舱段、冷气系统舱段、液压系统舱段、军械系统舱段、网络系 统舱段、无线电系统舱段、起落架系统舱段、仪表盘系统舱 段、氧气系统舱段和液压系统舱段等。主要基于面描述法 简化建立飞机的几何模型。面描述法指用平面四边形去近 似目标要害舱段的表面,用一个直角六面体(长方形)去近 似一个要害舱段,只要给出飞机结构6个平面上的节点坐 标和平面厚度,就可以描述该舱段。考虑真实的飞机几何 特征,一般常用圆台、任意平行四边形和长方体建立飞机几 何模型。该层级主要用于飞机结构被击中的概率等理论建 模研究。图3为简化后的F16模型。



图3 间化向的F16模型 Fig.3 Simplified F16 model

第二个层级是针对飞机中的某一典型易损结构易损性 评估。一般常采用强度等效理论,建立与典型易损结构等效 的等效靶板(见图4)。等效靶模型是对原来目标功能或结构 的近似,原来的目标结构越复杂,那么等效模型结构相应越 复杂,等效靶与原始目标的结构越相似,毁伤模拟效果也就 越准确。在建立等效靶板时,首先要确定等效靶的材料。等 效靶材料的选取原则是:以部件壳体或蒙皮的材料作为等效 靶材料,或者选对其抗侵彻性能的研究比较透彻的某种材 料。其次是确定等效靶的厚度,等效靶厚度的确定既要考虑 不同材料之间的等效关系,又要考虑间隔靶与单层靶之间的 等效关系,用的最多的就是强度等效理论,即等效厚度可根 据原部件本体材料与等效目标材料的强度极限比进行折算 得到。最后,需要保证几何外形接近实际结构。该层级主要 用于飞机典型易损结构毁伤失效建模研究。



#### 2.4 易损性评估准则

将作战飞机的毁伤等级分为损耗毁伤、任务放弃毁伤 和迫降毁伤三类。损耗毁伤是一种非常严重的毁伤,该级 别的损伤使飞机无法修复或不值得修复而被放弃,飞机将 被放弃或退出战场,从而无法继续执行指定的作战任务。

飞机遭受毁伤之后到其最终毁伤之前,时间是一个非常

重要的因素,因此根据时间的长短划分了4种不同的毁伤等级<sup>[1]</sup>。(1)KK级:飞机遭受打击后立即解体;(2)K级:飞机遭受打击后,30s内其损伤导致飞机失去了控制;(3)A级:飞机遭受打击后,5min内其损伤导致飞机失去了控制;(4)B级:飞机遭受打击后,30min内其损伤导致飞机失去了控制;(4)B级:飞机遭受打击后,30min内其损伤导致飞机失去了控制。任务放弃毁伤是指飞机的损伤程度导致其无法完成预先规定的任务,但不足以将其从编制中去掉,一般也称为C级损伤。 追降毁伤是指飞机的损伤程度尚不足以影响本次规定任务的执行,但会导致其无法执行之后的任务(通常情况下在着陆时可能会产生严重损伤),一般也称为E级损伤。

在各类毁伤源的作用下,飞机结构常用的毁伤准则有: 结构在击中下的毁伤概率准则、面积消除准则、临界速度准则、能量密度准则和冲击波毁伤准则等<sup>[1,3]</sup>。

(1) 结构在击中下的毁伤概率准则

该准则是侵彻体或破片质量和速度的函数,可以用图 形形式表示,或者用解析形式表示。该准则主要用于可被 一次打击毁伤的结构,如伺服机构、操纵杆等。P<sub>KH</sub>的数 值一般是在经验数据、工程判断和试验的基础上综合得 到的。

$$P_{\rm K/H} = \frac{A_{\rm V}}{A_{\rm P}}$$

式中:Av为结构总的易损面积;Ap为结构总的呈现面积。

(2) 面积消除准则

面积消除准则是指毁伤某一部件而必须从该部件上消 除的面积的具体数值。该准则应用于较大侵彻源和许多破 片的小间距打击,主要适用于气动外形类结构毁伤研究。

(3) 能量密度准则

能量密度准则通过作用在结构上的毁伤源的能量密度 阈值来判断结构的毁伤。该准则适用于多破片小间距的打击,主要用于较大结构(如燃油箱结构和发动机等)的毁伤 研究。对于存在最小质量临界值的结构,当毁伤源质量低 于临界值时,该准则不适用。

(4) 冲击波毁伤准则

冲击波毁伤准则通常用作用于目标上的压力和冲量的 临界值表示,该准则常用于飞机结构部件和控制面板的毁 伤研究。

#### 2.5 易损性评估方法

针对飞机结构在特定打击环境下的损伤概率评估,常用的评估方法有毁伤图法、状态转换矩阵法(马尔可夫链法)和简单评估方法<sup>[1,3]</sup>。

(1) 毁伤图法

毁伤图法就是用毁伤数图的形式表示目标受到不同次 数打击后所发生的事件及概率,将毁伤图中表示目标毁伤 事件的概率累加得到目标遭受不同次数打击后的概率值。 毁伤模型如图5所示。

(2) 状态转换矩阵法(马尔可夫链法)

毁伤源击中飞机后,飞机可能处于某种状态(如毁伤或 者非毁伤),把毁伤源击中飞机看作一系列独立事件,由于 毁伤源命中飞机的位置是随机的,所以飞机所处的状态也 是随机的,可将其过程模拟为马尔科夫过程。



(2)

Fig.5 Model of fault tree

(3) 简单评估方法

该方法基于结构在击中下的毁伤概率P<sub>K/H</sub>,忽略单独 结构在任何一次打击下毁伤的相互排斥性,快速简单准确 得到多次打击下毁伤概论的近似公式。

飞机n次打击后的杀伤概率P<sup>(n)</sup>即为:

$$P_{K/H}^{(n)} = 1 - \prod_{j=1}^{n} \left( 1 - P_{K/H}^{(j)} \right)$$
(3)

# 3 关键结构在典型毁伤效应下的易损性评估

认识关键结构在典型毁伤效应下的毁伤模式和失效机 理是结构易损性研究的基础,本文重点关注了燃油箱结构、 翼面/舵面结构、机身蒙皮结构的易损性评估研究进展。

# 3.1 燃油箱结构

当飞机油箱被高速破片击穿时,高速破片将动量和能 量传递给燃油,在燃油中引起强烈的压力脉冲,并伴随有空 腔、高压等现象,引发水锤效应,导致结构严重损伤,是燃油 箱结构的主要毁伤模式。20世纪70年代上半叶,美军海军 研究生院和海军武器中心开展了充液油箱抗破片冲击性能 的合作研究计划<sup>[10]</sup>, Fuhs<sup>[11]</sup>、Patterson<sup>[12]</sup>, Bless<sup>[13-14]</sup>, Lundstrom<sup>[15-16]</sup>等开展了燃油箱结构抗射弹冲击试验研究。 其采用试验手段,分别研究了射弹速度、角度以及燃油箱材 料等对燃油箱结构水锤效应毁伤的影响,并测量了破片冲 击过程中流体压力变形、结构壁板的应变变化和毁伤程度 等。进入21世纪,Scott等<sup>[17]</sup>基于C-27机翼油箱,根据飞行 过程中的机翼受载情况,在测试中采用液压加载装置配合 专用工装对机翼施加模拟载荷,确保弯矩、剪切载荷与飞机 机翼设计载荷相等,研究了飞行状态下机翼油箱在子弹水 锤效应作用后的易损性(剩余强度、冲击温度、泄漏率)。 C-27机翼油箱易损性试验如图6所示。

Varas 等<sup>[18-21]</sup>开展了大量燃油箱结构抗破片冲击毁伤 研究。其采用试验和数值相结合的研究方法,研究了破片



速度、充液比例、金属/复合材料燃油箱结构等对燃油箱结构毁伤的影响,并获得了破片速度、前后壁板应变-时间曲线以及流体压力变化。同时,Varas首次对比了随机拉格朗日-欧拉法(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)和光滑粒子流体动力学法(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)两种数值分析方法在模拟燃油箱破片冲击过程的差异性。 Varas研究如图7所示。



图7 Varas研究 Fig.7 Varas study

Masahiro等<sup>[22]</sup>基于试验分析了燃油箱结构裂纹扩展因素;Disimile等<sup>[23]</sup>研究了破片材质(钨合金、铝合金和钢弹)对燃油箱结构毁伤的影响;Deletombe等<sup>[24]</sup>分析了燃油箱结构的壁板对水锤效应冲击波的影响;Artero-Guerrero等<sup>[25]</sup>基于耦合欧拉-拉格朗日法(Coupled Euler-Lagrange,CEL)建模方法,分析了碳纤维复合材料燃油箱结构在破片高速冲击下的毁伤规律。

张伟等<sup>[26-28]</sup>、黄威<sup>[29]</sup>开展了破片低速冲击试验,主要关 注的是破片速度衰减、形成的空腔形态以及冲击波衰减规 律。肖统超等<sup>[30]</sup>、纪杨子燚等<sup>[31]</sup>利用弹道枪,分析了不同类 型破片(钨球、穿燃破片及反应破片)、破片速度等对燃油箱 结构的毁伤影响,获得了燃油箱结构最大变形及变形范围 扩展规律。张一<sup>[32]</sup>开展了水锤效应测量试验方法研究,描 述了破片速度对燃油箱结构的毁伤程度影响。郭军等<sup>[33]</sup>基 于二级空气炮系统,形成了燃油箱结构水锤效应试验方法 和数据测试能力,开展了基于真实机翼燃油箱盒段结构的 燃油箱结构水锤效应研究。水锤效应试验图如图8所示。

在数值仿真方面,白强本等<sup>[34]</sup>采用ALE方法,研究了破 片速度和充液比例对燃油箱结构的毁伤效应;薛瑞峰等<sup>[35]</sup> 分析了破片的长径比对燃油箱结构的毁伤影响;陈亮等<sup>[36]</sup> 采用SPH建模方法,考虑了破片的威胁打击方向对燃油箱结 构的毁伤影响;马丽英等<sup>[37]</sup>分析了水、柴油和航空煤油三种



图 8 水锤效应试验 Fig.8 Experiment of hydrodynamic ram

充液介质对燃油箱结构毁伤影响,为相关试验中一般选用水 介质(主要为安全考虑)提供了数值支撑。韩璐等<sup>[38]</sup>系统性 分析了破片速度、破片材料、破片形状、入射角度、燃油箱结 构充液比等因素对结构的毁伤影响,并初步给出了最大变形 比与各物理量之间的经验公式。此外,张里伟<sup>[39]</sup>、陈照峰<sup>[40]</sup>、 李亚智<sup>[41]</sup>等也针对射弹冲击充液油箱过程进行了研究。

基于对燃油箱结构在不同毁伤源作用下的毁伤特性研 究,学者们还开展了高抗损燃油箱结构设计研究。Zapel<sup>[42]</sup>通 过在燃油箱结构内部增加泡沫内衬,通过试验发现该方法可 有效降低射弹冲击过程中对油箱的破坏;Townsend等<sup>[43]</sup>为了 降低充液油箱的破坏程度,采用两种方法:在油箱内填充含 空气的薄板和使空气冒泡穿过流体,这两种技术均是通过引 人低阻抗来干扰或分散射弹冲击产生的冲击波;Childress<sup>[44]</sup> 提出了蜂窝式翼盒结构,设计了5种方案的翼盒结构:正方形 蜂窝式翼盒结构、三角形蜂窝式翼盒结构、复合材料翼梁结 构、钛合金翼梁结构、钛合金翼梁和复合材料翼梁混合布置 结构,通过试验发现钛合金翼梁和复合材料翼梁混合布置 结构不仅质量最轻,而且能够保证在射弹高速冲击下,造成 的损伤控制在5个翼盒结构之内。

Disimile等<sup>[45]</sup>从结构设计、优化出发,通过在箱体内部 设计锯齿结构,产生大量干扰波,通过波的相互作用破坏、 抵消射弹冲击过程中产生的冲击波,进而保证结构的安全 性,最后通过试验验证了该结构降低充液油箱破坏的有效 性;Artero-Guerrero等<sup>[46]</sup>提出了铝蜂窝式设计方法,通过在 铝管中填放铝蜂窝材料,在保证重量增加只有6.8%的情况 下,明显限制空腔的扩展膨胀,减小射弹冲击下充液铝管的 变形损伤程度。Artero-Guerrero设计的油箱如图9所示。 Varas等<sup>[47]</sup>通过在充液油箱结构中添加金属夹层壁板的方 式,发现部分构型可有效降低后壁板的变形程度,但对流体 压力峰值基本没有影响。张字等<sup>[48-49]</sup>设计了典型格栅式燃 油箱结构,并通过试验和数值分析方法,研究了格栅数量、 射弹速度、结构构型、充液比例、液面压力、流体黏性等对燃 油箱结构的抗毁伤影响,验证该燃油箱结构在高速射弹冲 击下的毁伤特性。



图 9 Artero-Guerrero设计的油箱 Fig.9 Artero-Guerrero designed fuel tank

# 3.2 翼面/舵面结构

翼面/舵面结构易损性可分为一次损伤和二次损伤,一次损伤是研究翼面/舵面结构被破片、爆炸冲击波等毁伤源击中下的损伤,二次损伤是研究翼面/舵面结构被破片、爆炸冲击波等毁伤源击中下导致的气动特性损伤变化。自20世纪60年代开始,以美国、德国和英国为首的西方军事强国,投入大量人力、物力和财力,通过实弹打击/爆炸试验获得了大量的数据,建立了大量的模型,编写了相关手册<sup>[50-51]</sup>,形成一批有价值的理论成果<sup>[52-58]</sup>,但少见公开报道。如Robert<sup>[1]</sup>指出,2lbf/in<sup>2</sup>(1lbf~4.448N)的冲击过压作用于水平尾翼表面上1ms即可导致结构产生损伤,无法承受飞行载荷。

国内在一次损伤研究方面,冯晓伟等<sup>[59]</sup>以爆炸冲击波作 为毁伤源,考虑飞行中的动态载荷的影响,分析了典型机翼 翼面结构在冲击波作用下的失效过程,获得了机翼翼面结构 失效的冲击波超压-冲量准则,确定了飞机机翼翼面的失效 判据。赵汝岩等<sup>[60]</sup>基于厚度等效原理,将飞机翼面/舵面结构 等效为不同厚度的靶板,得到了造成不同等级毁伤所需的高 速动能弹的直径与速度。徐梓熙等<sup>[61]</sup>研究了钢制破片和活 性破片对飞机翼面/舵面结构的毁伤效果,发现活性破片对飞 机翼面/舵面结构具有更强的毁伤能力。张宇等<sup>[62]</sup>基于强度 等效原理,将典型飞机舵面结构简化为V形靶板,获得了结 构变形以及破片剩余速度等变化规律,分析了破片角度对结 构损伤失效的影响。毁伤试验图如图10所示。

在二次损伤研究方面,高玉伟等<sup>[63]</sup>基于经验证的飞机 翼面数值分析模型,研究了破片、离散杆、连续杆破片对飞 机翼面结构的损伤影响,并进一步分析损伤后的机翼气动 特性,表明连续杆战斗部对飞机翼面的二次损伤更严重,甚 至可能导致飞机在特定状态下的杀伤。于克杰等<sup>[64]</sup>针对飞 机舵面结构,基于真实受载特性的分析,建立了舵面结构高 应力部位的数值分析模型,并分析不同损伤尺寸对应力分 布以及舵面功能的影响,为损伤后的限制飞行和修改提供



图 10 毁伤试验 Fig.10 Damage experiment

的数据支撑。陈志伟<sup>[65]</sup>、贾忠湖等<sup>[66]</sup>、巩彦明等<sup>[67]</sup>基于面积 消去原理等效破片在翼面/舵面结构形成的损伤,分析了不 同损伤程度下翼面/舵面结构的气动特性和性能降级,获得 其易损特性。二次损伤研究试验图如图11所示。



#### 3.3 机身壁蒙皮结构

机身壁蒙皮结构的易损性研究多采用强度等效原理, 将其等效为加筋壁板结构,主要考虑爆炸冲击波和破片等 毁伤源。程帅等<sup>[68]</sup>基于爆炸冲击试验,获得了飞机典型加 筋结构的反射超压历程、应变、位移等结构响应,并结合数 值分析,研究了典型加筋结构在爆炸冲击载荷下的变形分 布规律和塑性毁伤特性。刘宗兴等<sup>[69]</sup>则从民航客机的最小 风险炸弹位置适航要求出发,数值分析研究了飞机机身内 部爆炸对典型机身壁板/蒙皮结构的毁伤响应及破坏模式 的影响,同时分析了爆炸毁伤后的剩余强度,提出了表征剩 余强度的无量纲系数,并最终建立了剩余强度无量纲(量纲 一)系数与爆炸当量及爆炸距离之间的经验公式。周书 婷<sup>[70]</sup>基于近爆场下周边固支结构的爆炸冲击试验,验证了 有限元模型的有效性,并得到了四边固支铝合金加筋壁板 结构的动态响应及破坏模式。姚武文等<sup>[71]</sup>通过典型事例分 析,研究了爆炸载荷下飞机蒙皮结构的崩落损伤,并重点讨 论了爆炸距离、爆炸当量对蒙皮结构崩落损伤的影响,建立 了相应的经验计算公式。机身壁蒙皮结构爆炸试验如图12 所示。



图 12 机身壁蒙皮结构爆炸试验 Fig.12 Explosion experiment of fuselage wall skin structure

潘庆军等<sup>[72]</sup>以飞机硬铝加筋蒙皮结构为研究对象,分 析了杆式破片不同冲击速度和攻击角度对加筋蒙皮结构的 毁伤,得到了加筋蒙皮结构的损伤情况以及破片的剩余速 度、剩余质量、冲塞块质量、塑性变形区域等随入射速度与 迎角的变化规律。孟文<sup>[73]</sup>则较为系统地分析了杆式破片、 六面体破片、球形破片、立方体破片等对薄板蒙皮以及Z形 加筋蒙皮壁板的毁伤,得到破片极限穿透速度、剩余速度、 剩余质量以及靶板进入塑性变形区域的尺寸等破坏结果, 并给出了特定条件下适用的经验公式。此外,宋丽丽<sup>[74]</sup>采 用理论、数值与试验相结合的研究方法,分析了横向效应增 强型侵彻体(PELE)破片对金属薄板的毁伤。陈国乐 等<sup>[75-76]</sup>建立了离散杆破片对飞机壁板蒙皮的毁伤模型,得 到了破片速度和蒙皮厚度对毁伤效应的影响。

# 4 关键结构多毁伤效应作用下的易损性评估

对于作战飞机,在真实的作战场景下,往往面临导弹战 斗部爆炸后的碎片云、地面高炮和航炮连续发射等动能弹 毁伤源的威胁,因此多毁伤效应的研究更具现实意义。

#### 4.1 多发动能弹多次毁伤

针对易损结构多次毁伤,蓝肖颖等<sup>[77]</sup>以飞机燃油箱结构为研究对象,研究了双动能破片毁伤源对充液结构的毁伤,并重点分析了水锤效应压力载荷的叠加及其与毁伤源距离之间的变化规律。杨砚世等<sup>[78]</sup>在通过对比单破片、多破片冲击充液燃油箱结构,发现破片间距约为8.3倍的破片直径时油箱结构变形最大。韩璐等<sup>[79]</sup>基于经验证的数值分析模型,分析了双破片间距、时间间隔、以及多枚破片同时作用下的水锤效应载荷叠加以及结构壁板的变形规律。多次毁伤研究试验图如图13所示。

针对飞机多次毁伤概率,韩璐等<sup>[80]</sup>分析了混合破片双 层战斗部、混合破片单层战斗部、单种破片双层战斗部和单



图 13 多次毁伤研究 Fig.13 Multiple damage study

种破片单层战斗部对飞机不同舱段结构的杀伤概率,表明 相同战斗部尺寸时,混合破片双层战斗部对飞机的杀伤概 率最高。侯志强等<sup>[81]</sup>基于非余度部件对非余度部件、非余 度部件对余度部件、余度部件对非余度部件、余度部件对余 度部件4种情况,分析了多次击中条件下飞机结构部件的 毁伤概率。李向东等<sup>[82]</sup>将飞机分成不同的存在状态,根据 飞机部件的抗毁伤能力及呈现面积,得出飞机状态转移概 率,并基于多次毁伤得到的转移概率以及飞机的初始状态, 得到多次毁伤下飞机的毁伤概率。

# 4.2 爆炸冲击波/破片耦合作用

导弹近距离爆炸时,易损结构的毁伤特性需要综合考虑 爆炸冲击波和破片的共同影响。董秋阳<sup>[83]</sup>基于爆炸冲击波/ 破片联合毁伤试验结果,结合数值分析,系统性分析了蒙皮 结构在破片以及爆炸冲击波作用下的损伤形式和损伤程度, 并详细讨论了破片和冲击波联合作用顺序对蒙皮的损伤影 响,得到了破片速度、冲击波峰值超压、正压区作用时间三个 因素对复合作用损伤结果的影响规律。冯顺山等[8485]基于小 型导弹战斗部对飞机结构的毁伤试验,研究破片和爆炸冲击 波毁伤效应,并应用数理统计方法给出了"杀爆相关毁伤准 则"的工程计算式。郭淼等[86]则针对相控阵雷达天线罩结 构,建立了相控阵雷达天线罩等效靶板钨破片侵彻下的爆炸 冲击毁伤有限元模型,分析了破片先到达情况下的联合毁 伤,并对比了破片侵彻(毁伤耦合)和预先打孔(毁伤解耦)结 构分析的差异性。此外,郑红伟等[87]、段新峰等[88]、张成亮 等<sup>[89]</sup>等基于试验和数值分析方法,研究了爆炸冲击波和高速 破片对加筋平板结构的复合作用,分析了毁伤形貌。爆炸冲 击波/破片耦合试验研究图如图14所示。

# 5 结论与展望

# 5.1 **结论**

基于战争经验的总结,生存力已成为作战飞机的重要 设计指标,各航空强国均建立了生存力设计与评估的规范 体系和试验体系。生存力分为敏感性和易损性两大领域, 结构易损性表征了关键结构被命中后的毁伤概率,是易损



图 14 爆炸冲击波/破片耦合试验研究 Fig.14 Experimental study on explosion shock wave/fragment coupling

性研究的重点和热点。相关研究主要聚焦于毁伤效应、机体结构的易损性建模方法、结构易损性的评价准则和评估 方法等,已形成了相关的设计规范,开发了多类型的易损性 评估软件。

在关键结构易损性评估方法研究方面,采取试验与数 值方法,研究了典型毁伤效应和多毁伤效应耦合作用下,燃 油箱结构、翼面/舵面结构和机身蒙皮结构的易损性评估的 试验方法和数值方法。对于燃油箱结构,评估了射弹类型、 射弹速度、结构构型、充液比例、液面压力、流体黏性等对燃 油箱结构易损性的影响,特别关注了水锤效应这一燃油箱 特有的气-固-液耦合毁伤模式。对于翼面/舵面结构和蒙 皮结构,则评估了爆炸超压、破片类型、破片速度、飞行状态 等对结构易损性的影响,并建立了剩余强度评估的方法。

#### 5.2 展望

作战飞机结构易损性评估是复杂的系统工程,贯穿了 飞机研制和服役的全过程。先进作战飞机对结构易损性技 术提出了更高的要求,如在结构方面,下一代作战飞机将更 多的使用新材料(如高性能复合材料、先进轻质金属等),并 采用新的制造技术(如增材制造、大型整体化结构等),同时 还将面临新的毁伤效应威胁(包括传统毁伤威胁的升级如 更高能量的破片,以及激光、电磁等新毁伤威胁)。应重点 关注的研究方向包括:

(1)建立典型飞机结构的损伤准则,如高性能复合材料结构、先进金属结构等在典型毁伤效应作用下的毁伤判据,建立系统级和部件级别的易损性评估方法。

(2)研究典型飞机结构在激光等新毁伤效应作用下的 毁伤机理,获得激光参数、大气条件、照射时间等对材料或 结构失效的影响规律,并考虑应力边界、飞行状态等对失效 模式的影响等,并开发隐身-防护多功能涂层材料与工艺。

(3)研发结构易损性评估软件系统,建立支撑软件的 材料数据库和典型结构毁伤数据库,为结构高生存力设计 工具提供支撑。 (4)构建完善作战飞机结构易损性试验能力体系,特别 是实验室试验能力,建立起相关的试验规范,形成面向真实 作战环境的结构响应测试能力和连续观测能力。

#### 参考文献

- Robert E B. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design[M]. Second edition. Reston, V.A. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [2] Committee on Weapons Effects on Airborne Systems.
   Vulnerability assessment of aircraft: A review of the department of defense live fire test and evaluation program
   [M]. Washington, D.C: National Academy Press, 1993.
- [3] 李向东,杜忠华.目标易损性[M].北京:北京理工大学出版 社,2013.
  Li Xiangdong, Du Zhonghua. Target vulnerability[M]. Beijing:

Beijing Institute of Technology Press, 2013.(in Chinese)

- [4] Mike P, Ian M. Design aspects of aircraft vulnerability[J/OL].
   [2020-09-27]. https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae438.
- [5] 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 Astronnautica Sinica, 2016, 37(1): 216-234. (in Chinese)

[6] 裴扬,宋笔锋,李占科.飞机易损性评估的基本方法研究[J].弹箭与制导学报,2004,24(2):70-74.

Pei Yang, Song Bifeng, Li Zhanke. Research on basic methods of aircraft vulnerability assessment[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(2): 70-74. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 李旭东. JSSG 系列规范飞机生存力要求介绍[J]. 航空标准化 与质量, 2010(3): 53-56.

Li Xudong. Introduction of JSSG series specification aircraft survivability requirements[J]. Aeronautica Standardization &

Quality, 2010 (3): 53-56. (in Chinese)

[9] 张旭,张涛,赵汉武.现代战斗机威胁源分类方法[J]. 飞机设 计, 2019, 39(5): 52-56.

Zhang Xu, Zhang Tao, Zhao Hanwu. Classification of modern fighter threat sources[J]. Aircraft Design, 2019, 39(5): 52-56. (in Chinese)

- [10] 陈钢.高速弹丸冲击下油箱动态响应的数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
   Chen Gang. Numerical simulation of dynamic response of fuel tank under impact of high-speed projectile[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.(in Chinese)
- [11] Fuhs A E, Ball R E, Power H L. FY 73 hydraulic ram study[R]. AD776536, 1974.
- [12] Patterson J W. Fuel cell pressure loading during hydraulic ram[R]. ADA012411, 1975.
- [13] Bless S J, Fry P F, Barber J P, et al. Studies of hydrodynamic ram induced by high velocity spherical fragment simulators[R]. ADA055003, 1977.
- [14] Bless S J. Fuel tank survivability for hydrodynamic ram induced by high-velocity fragments. Part I. Experimental results and design summary[R]. AFFDL-TR-78-182, 1979.
- [15] Lundstorm E A. Structural response of flat panels to hydraulic ram pressure loading[R]. ADA200410, California: Naval Weapons Center, 1988.
- [16] Lundstorm E A, Anderson T. Hydraulic ram model for high explosive ammunition[C]// ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Honolulu, 1989.
- [17] Scott W, Marcus M, Dan C. Joint cargo aircraft hydrodynamic ram LFT&E[J]. Aircraft Survivability, 2010(1): 24-28.
- [18] Varas D, Lopez-Puente J, Zaera R. Experimental analysis of fluid-filled aluminum tubes subjected to high-velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36: 81-91.
- [19] Varas D, Zaera R, Lopez-Puente J. Numerical modelling of the hydrodynamic ram phenomenon[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36: 363-374.
- [20] Varas D, Zaera R, Lopez-Puente J. Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to hydrodynamic ram[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 16: 19-28.
- [21] Varas D, Lopez-Puente J, Zaera R. Numerical analysis of the

hydrodynamic ram phenomenon in aircraft fuel tanks[J]. AIAA Journal, 2012, 50(7): 1621-1630.

- [22] Masahiro N, Koichi T. Experimental study of perforation and cracking of water-filled aluminum tubes impacted by steel spheres[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32: 2000-2016.
- [23] Disimile P J, Swanson L A, Toy N. The hydrodynamic ram pressure generated by spherical projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36: 821-829.
- [24] Deletombe E, Fabis J, Dupas J, et al. Experimental analysis of 7.62mm hydrodynamic ram in containers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 37: 1-21.
- [25] Artero-Guerrero J, Pernas-Sanchez J, David V, et al. Numerical analysis of CFRP fluid-filled tubes subjected to high-velocity impact[J]. Composite Structures, 2013, 96: 286-297.
- [26] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 579-584.
  Zhang Wei, Guo Zitao, Xiao Xinke, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 579-584. (in Chinese)
- [27] 郭子涛,张伟,郭钊,等.截卵形弹水平入水的速度衰减及空泡扩展特性[J].爆炸与冲击,2017,37(4):727-732.
  Guo Zitao, Zhang Wei, Guo Zhao, et al. Characteristics of velocity attenuation and cavity expansion induced by horizontal water-entry of truncated-ogive nosed projectiles[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(4): 727-732. (in Chinese)
- [28] 张伟,黄威,任鹏,等.高速弹体水平入水产生冲击波特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(4):37-41.

Zhang Wei, Huang Wei, Ren Peng, et al. The underwater shock wave characteristics caused by high speed horizontal water entry projectiles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(4): 37-41. (in Chinese)

[29] 黄威.高速弹体水平入水特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业 大学,2013.

Huang Wei. Research on the horizontal water penetration characteristics of high-speed projectiles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.(in Chinese)

- [30] 肖统超,陈文,王绍慧,等.不同破片杀伤元对飞机油箱的毁伤 试验[J].四川兵工学报,2010,31(12):32-34.
  Xiao Tongchao, Chen Wen, Wang Shaohui, et al. Damage test of different fragment killing elements on aircraft fuel tank[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(12): 32-34. (in Chinese)
- [31] 纪杨子燚, 李向东, 周兰伟, 等. 高速破片撞击充液容器形成 液压水锤的试验研究[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(3): 70-76.

Ji Yangziyi, Li Xiangdong, Zhou Lanwei, et al. Experimental study on hydrodynamic ram generated by high velocity fragment impacting fluid-filled container[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(3): 70-76. (in Chinese)

[32] 张一.水锤作用过程的多参数测量研究[D].南京:南京理工 大学,2018.

Zhang Yi. Research on multi-parameter measurement of hydrodynamic ram phenomenon action process[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[33] 郭军,张宇,舒挽.油箱水锤效应试验方法研究[J]. 航空科学 技术, 2019, 30(3): 63-70.

Guo Jun, Zhang Yu, Shu Wan. Experimental study on hydrodynamic ram phenomenon of fuel tank[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(3): 63-70. (in Chinese)

- [34] 白强本,李向东,贾飞. 高速破片撞击飞机油箱的数值模拟研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(1): 35-38.
  Bai Qiangben, Li Xiangdong, Jia Fei. Numerical simulation on high-speed fragment impact against an aircraft fuel tank[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(1): 35-38. (in Chinese)
- [35] 薛瑞峰,刘迎彬,张婧.不同长径比弹丸对飞机燃油箱的毁伤 效应研究[J]. 火工品, 2020(4): 44-47.
  Xue Ruifeng, Liu Yingbin, Zhang Jing. Research on the damage effect of projectiles with different length-to-diameter ratio on aircraft fuel tank[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020 (4): 44-47. (in Chinese)
- [36] 陈亮,宋笔锋,裴扬,等.威胁打击方向对飞机油箱液压冲击易损性的影响分析[J]. 机械强度, 2012, 34(6): 807-811.
   Chen Liang, Song Bifeng, Pei Yang, et al. Impact analysis of

threat directions to hydrodynamic ram vulnerability of aircraft fuel tank[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(6): 807-811. (in Chinese)

[37] 马丽英,李向东,周兰伟,等.高速破片撞击充不同介质液体 容器的数值计算及试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24): 115-122.

Ma Liying, Li Xiangdong, Zhou Lanwei, et al. Numerical simulation and experimental study on high-speed fragment impact filling different liquid containers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24): 115-122. (in Chinese)

 [38] 韩璐,韩庆,杨爽.飞机油箱水锤效应影响因素及其影响程度 研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 489-500.
 Han Lu, Han Qing, Yang Shuang. Simulation analysis of

hydrodynamic ram factors and effects in aircraft fuel tank[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9 (4): 489-500. (in Chinese)

- [39] 张里伟,黄晓霞,胡益富,等.高速弹头打击下机翼油箱的动态响应分析[J]. 教练机, 2015 (4): 37-40.
  Zhang Liwei, Huang Xiaoxia, Hu Yifu, et al. Analysis on dynamic response of wing tank under high-speed warhead impact[J]. Trainer, 2015 (4): 37-40. (in Chinese)
- [40] 陈照峰, 刘国繁, 高伟, 等. 高速子弹穿透充液油箱的数值模 拟[J]. 航空计算技术, 2014, 44(1): 98-101.

Chen Zhaofeng, Liu Guofang, Gao Wei, et al. Numerical simulation of filled fuel tank submitted high-speed bullet penetrated[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(1): 98-101. (in Chinese)

[41] 李亚智, 陈钢. 充液箱体受弹丸撞击下动态响应的数值模拟 [J]. 机械强度, 2007, 29(1): 143-147.

Li Yazhi, Chen Gang. Numerical simulation of liquid-filled tank response to projectile impact[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1): 143-147. (in Chinese)

- [42] Zabel P H. Test evaluation of shock buffering concept for hydrodynamic ram induced by yawing projectile impacting a simulated Integral fuel tank[R]. The Shock and Vibration Information Center, 1979.
- [43] Townsend D, Park N, Devall P M. Failure of fluid dilled structures due to high velocity fragment impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 29(1-10): 723-733.

- [44] Childress J. Development of survivable co-cured wing structures[C]// Anabeim: AIAA and SAE, 1998 World Aviation Conference, 1998.
- [45] Disimile P J, Davis J, Toy N. Mitigation of shock waves within a liquid filled tank[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38: 61-72.
- [46] Artero-Guerrero J, David. V, Pernas-Sánchez J, et al. Experimental analysis of an attenuation method for hydrodynamic ram effects[J]. Materials and Design, 2018, 155: 451-462.
- [47] Varas D, López-Puente J, Zaera R. Numerical study of the effects of metallic plates in the attenuation of the HRAM phenomenon[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 566: 511-516.
- [48] 张宇, 王彬文, 刘小川, 等. 充液格栅结构抗射弹冲击数值模 拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7689-7695.
  Zhang Yu, Wang Binwen, Liu Xiaochuan, et al. Numerical simulation of projectile impact of liquid-filled grid structures
  [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7689-7695. (in Chinese)
- [49] 张宇, 王彬文, 刘小川, 等. 充液格栅结构抗射弹冲击特性研 究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7288-7296.
  Zhang Yu, Wang Binwen, Liu Xiaochuan, et al. Research on anti-projectile impact characteristics of liquid-filled grid structure[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (18): 7288-7296. (in Chinese)
- [50] USAF. Manual, Technical: aircraft battle damage assessment and repair[R]. MIL-M-87158A (USAF), 1988.
- [51] Holcomb D H. Aircraft battle damage repair for the 90s and beyond[R]. AU-ARI-93-4, 1994.
- [52] Meo M, Morris A J, Vignjevic R, et al. Numerical simulations of low-velocity impact on an aircraft sandwich panel[J]. Composite Structures, 2003, 62(3-4): 353-360.
- [53] Riddle R, Lesuer D, Syn C, et al. Application of metal laminates to aircraft structures: Prediction of penetration performance[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1996, 23(2-4): 173-192.
- [54] Schneider P, Buchar F, Zapeca F. Structural response to thin steel shell structures due to aircraft impact[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999, 12(4): 325-329.

- [55] Jones N. A theoretical study of the dynamic plastic behavior of beams and plates with finite-deflections[J]. International Journal of Solids and Structures, 1971, 7(8): 1007-1029.
- [56] Anon. Aircraft hardening research programme final overview report[R].CAA Paper2001/09,2001.
- [57] Veldman R L, Ari-Gur J, Clum C. Response of pre-pressurized reinforced plates under blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(4): 240-250.
- [58] MacDonald B J. A computational and experimental analysis of high energy impact to sheet metal aircraft structures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(1-2): 92-98.
- [59] 冯晓伟, 卢永刚, 李永泽. 飞机目标在爆炸冲击波作用下的毁伤效应评估方法[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 124-128.
  Feng Xiaowei, Lu Yonggang, Li Yongze. Damage assessment method of aircraft targets under blast wave[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4): 124-128. (in Chinese)
- [60] 赵汝岩, 卢洪义, 朱敏. 高速动能体对飞机毁伤数值仿真[J].
  四川兵工学报, 2013, 34(1): 28-31.
  Zhao Ruyan, Lu Hongyi, Zhu Min. Numerical analysis of high-speed kinetic energy projectile mutilating to the aircraft[J].
  Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(1): 28-31. (in Chinese)
- [61] 徐梓熙, 刘彦, 闫俊伯, 等. 不同破片对典型飞机目标的毁伤 效应[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 63-68.
  Xu Zixi, Liu Yan, Yan Junbo, et al. Experimental investigation on the damage of aircraft subjected to different fragments loading[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(S2): 63-68. (in Chinese)
- [62] 张宇, 白春玉, 郭军, 等. V形铝合金靶板双射弹高速冲击损伤特性[J]. 航空科学技术, 2020, 31(9): 72-78.
  Zhang Yu, Bai Chunyu, Guo Jun, et al. High-speed impact damage characteristics of V aluminum target[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(9): 72-78. (in Chinese)
- [63] 高玉伟, 韩庆, 张锋, 等. 作战飞机翼面损伤对其气动特性的 影响研究[J]. 飞行力学, 2013, 31(5): 394-397.
  Gao Yuwei, Han Qing, Zhang Feng, et al. Influence of combat aircraft's wing surface damaged on longitudinal aerodynamic characteristics[J]. Flight Dynamics, 2013, 31(5): 394-397. (in Chinese)
- [64] 于克杰,曾庆韬,姚甲辰.飞机水平尾翼壁板破片打击损伤评 估与修理[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(2): 5-8.

Yu Kejie, Zeng Qingtao, Yao Jiachen. Assessment and repair of fragment-shot damage on the panel of horizontal tai[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(2): 5-8. (in Chinese)

[65] 陈志伟.受损飞机的气动仿真及性能降级分析方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2018.

Chen Zhiwei. Research on aerodynamic simulation and performance degradation analysis method of damaged aircraft [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)

- [66] 贾忠湖, 王刚, 柳文林. 基于 CFD 的机翼损伤飞机再平衡问题研究[J]. 飞行力学, 2018, 36(3): 19-22.
  Jia Zhonghu, Wang Gang, Liu Wenlin. Study on rebalance of wing damaged aircraft based on CFD[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(3): 19-22. (in Chinese)
- [67] 巩彦明, 韩庆. 战损飞机动力学特性分析及杀伤研究[J]. 航空工程进展, 2015, 6(1): 38-45.
  Gong Yanming, Han Qing. Dynamic analysis and damage study of combat aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(1): 38-45. (in Chinese)
- [68] 程帅, 刘文祥, 童念雪, 等.爆炸载荷下飞机典型加筋结构毁 伤特性[J].爆炸与冲击, 2021, 41(1): 88-95.
  Cheng Shuai, Liu Wenxiang, Tong Nianxue, et al. Damage mechanism of typical stiffened aircraft structures under explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41 (1): 88-95. (in Chinese)
- [69] 刘宗兴, 刘军, 李维娜. 爆炸冲击载荷下典型机身结构动响应 及破坏[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 162-173.
  Liu Zongxing, Liu Jun, Li Weina. Dynamic response and failure of typical fuselage structure under blast impact load[J].
  Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 162-173.
  (in Chinese)
- [70]周书婷.爆炸冲击载荷下铝合金机身壁板结构响应及破坏模式研究[D].天津:中国民航大学,2018.
  Zhou Shuting. Research on structural response and failure mode of aluminum alloy fuselage panels under explosive impact load[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018.(in Chinese)
- [71]姚武文,周平,侯日立.爆炸冲击波引起的飞机蒙皮崩落损伤 研究[J]. 机电产品开发与创新, 2011, 24(3): 26-28.

Yao Wuwen, Zhou Ping, Hou Rili. Study on avalanche damage of airplane skin by blast shockwave[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2011, 24(3): 26-28. (in Chinese)

- [72] 潘庆军, 周文武, 葛文军. 杆式破片对LY-12CZ加筋靶板的侵 彻规律研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2008,31(1): 43-47.
  Pan Qingjun, Zhou Wenwu, Ge Wenjun. Penetration rules of LY-12CZ reinforcement target board subjected to rod-shaped fragment[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(1): 43-47. (in Chinese)
- [73] 孟文.飞机壁板结构受侵彻时的数值计算分析[D]. 武汉:华 中科技大学, 2007.

Meng Wen. Numerical calculation and analysis of aircraft wall structure under penetration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.(in Chinese)

- [74] 宋丽丽. 横向效应增强型侵彻体垂直撞击金属薄靶机理研究
  [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
  Song Lili. Research on the mechanism of the lateral effect enhanced penetrator hitting a thin metal target vertically[D].
  Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
  (in Chinese)
- [75] 陈国乐,李海兵,张启明,等. 离散杆破片对飞机壁板毁伤效 应仿真[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(10): 130-133.
  Chen Guole, Li Haibing, Zhang Qiming, et al. Study of simulation of integral panel of an aircraft damage effect caused by rod[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(10): 130-133. (in Chinese)
- [76] 陈国乐,李海兵,康建设,等.破片对飞机壁板冲击损伤仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(8): 4-7.
  Chen Guole, Li Haibing, Kang Jianshe, et al. Study on simulation of fragment impact integral panel of an aircraft[J]. Computer & Digital Engineering, 2011, 39(8): 4-7. (in Chinese)
- [77] 蓝肖颖,李向东,周兰伟,等.双破片撞击充液容器时液体内 压力分布研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 191-197.
  Lan Xiaoying, Li Xiangdong, Zhou Lanwei, et al. Pressure distribution inside liquid during a liquid-filled vessel impacted by double-fragment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19): 191-197. (in Chinese)
- [78] 杨砚世,肖志华,李向东.破片撞击燃料箱时水锤效应的数值 仿真研究[J].爆破器材,2014,43(4):26-31.

Yang Yanshi, Xiao Zhihua, Li Xiangdong. Numerical simulation study on hydrodynamic ram due to the penetration of fuel tank by high energy fragments[J]. Explosive Materials, 2014, 43(4): 26-31. (in Chinese)

- [79] 韩璐,韩庆,杨爽. 多破片高速冲击下飞机油箱水锤效应数值 模拟[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 473-484.
  Han Lu, Han Qing, Yang Shuang. Simulation analysis of hydrodynamic ram in an aircraft fuel tank subjected to highvelocity multi-fragment impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3): 473-484. (in Chinese)
- [80] 韩璐, 韩庆. 飞机在模拟混合破片威力场打击下的易损性计算[J]. 航空工程进展, 2014, 5(4): 455-462.
  Han Lu, Han Qing. Calculation on the vulnerability of aircraft from a simulation mixed fragment warhead[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(4): 455-462. (in Chinese)
- [81] 侯志强, 孟维杰. 多击中条件下军用飞机二次效应评估方法 研究[J]. 兵工学报, 2007,28(1): 78-82.
  Hou Zhiqiang, Meng Weijie. A study on quadratic effect assessment method of military aircraft under multiple hit[J].
  Acta Armamentarii, 2007,28(1): 78-82. (in Chinese)
- [82] 李向东,张运法,董旭意.多发动能弹丸对飞机的毁伤计算研 究[J].弹道学报, 1998, 10(4): 63-66.
  Li Xiangdong, Zhang Yunfa, Dong Xuyi. Study on aircraft damage in the effect of multiple kinetic projectiles[J]. Journal of Ballistics, 1998, 10(4): 63-66. (in Chinese)
- [83] 董秋阳. 机翼蒙皮在破片和冲击波作用下的损伤研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

Dong Qiuyang. Research on the damage of wing skin under the action of fragments and shock waves [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

[84] 冯顺山,蒋浩征.小药量爆炸冲击波对飞机毁伤效应的研究
[J].兵工学报, 1987, 8(1): 17-25.
Feng Shunshan, Jiang Haozheng. Study on the damage effect

of small charge explosion shock wave on aircraft[J]. Acta Armamentarii, 1987, 8(1): 17-25. (in Chinese)

 [85] 冯顺山,蒋浩征.爆炸冲击波与杀伤破片对飞机目标相关毁伤效应的研究[J].北京工业学院学报,1986 (1): 119-131.
 Feng Shunshan, Jiang Haozheng. An investigation on fragmentlast interrelated damage effect on aircraft targets[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1986(1): 119-131. (in Chinese)

- [86] 郭淼, 袁俊明, 刘玉存, 等. 破片和冲击波对相控阵雷达天线 罩的复合毁伤研究[J]. 爆破, 2014, 31(1): 114-117, 149.
  Guo Miao, Yuan Junming, Liu Yucun, et al. Simulation of composite damage for phased array radome by fragments and shock wave[J]. Blasting, 2014, 31(1): 114-117, 149. (in Chinese)
- [87] 郑红伟,陈长海,侯海量,等.爆炸冲击波和高速破片载荷的复合作用特性及判据研究[J].振动与冲击,2019,38(3):24-31,38.
  Zheng Hongwei, Chen Changhai, Hou Hailiang, et al. Multiple impact features of blast shock waves and high-velocity fragments on clamped square plates and a criterion to judge if multiple impact happens[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(3): 24-31, 38. (in Chinese)
- [88] 段新峰,程远胜,张攀,等.冲击波和破片联合作用下I型夹 层板毁伤仿真[J].中国舰船研究, 2015, 10(6): 45-59.
  Duan Xinfeng, Cheng Yuansheng, Zhang Pan, et al. Numerical analysis of the damage on I-core sandwich panels subjected to combined blast and fragment loading[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(6): 45-59. (in Chinese)
- [89] 张成亮,朱锡,侯海量,等.爆炸冲击波与高速破片对夹层结构的联合毁伤效应试验研究[J].振动与冲击,2014,33(15): 184-188.

Zhang Chengliang, Zhu Xi, Hou Hailiang, et al. Tests for combined damage effect of blast waves and high-velocity fragments on composite sandwich plates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 184-188. (in Chinese)

# Research Progress and Prospects of Vulnerability Assessment Methods for Key Structures of Combat Aircraft

# Liu Xiaochuan, Zhang Yu

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi' an 710065, China

**Abstract:** Combat survivability which is divided into sensitivity and vulnerability is the key design index of aircraft. Vulnerability focuses on the damage characteristics of aircraft after being hit by damage threat. And the commonly used measure is the kill probability or vulnerable area. Structure is the carrier of combat aircraft function, so the structural vulnerability is the basis of the aircraft's vulnerability. The design specifications put forward clear requirements for structural vulnerability which is usually evaluated by experimental and numerical methods. This paper introduces the process, the requirements and research system of relevant design specifications, the main damage threats and killing modes, the structural vulnerability modeling and determination methods of aircraft structural vulnerability research. Then it summerizes the vulnerability assessment methods of vulnerable structures such as fuel tank and control surface under typical damage effects and the coupling of multiple damage effects. Finally, combined with the development of advanced aviation structure technology and new damage technology, the development direction and focus of structural vulnerability assessment method are prospected.

Key Words: combat aircraft; survivability; vulnerability; key structure; assessment method