

航空发动机终端威胁作用机理和威胁模式分析

王春晖¹, 邢洋², 李兆红², 田申²

(1. 海军装备部, 北京 100071; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 战机及其配装的发动机在战场执行任务时, 不可避免地会遭遇敌方防空武器的威胁, 终端威胁对施加损伤起关键作用。针对发动机(飞机)在战场执行攻击任务时可能遭遇的不同类型威胁, 重点对终端威胁作用机理和威胁模式开展分析。从终端威胁产物杀伤机理(威胁机理)出发, 描述了穿透物、破片、燃烧物质、爆炸冲击波、高能激光和生化制剂等常见终端威胁产物的输出特性。在此基础上, 对航空发动机典型 7 大部件遭受的威胁模式开展分析, 给出了相关威胁模式可能给各大部件带来的损伤模式。上述威胁分析结果可供发动机及部件易损性分析时借鉴, 也可供发动机生存力或易损性设计参考。

关键词: 终端威胁; 威胁模式; 损伤模式; 生存力; 易损性; 航空发动机

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.04.005

Terminal Threat Mechanism and Threat Mode Analysis of Aeroengine

WANG Chun-hui¹, XING Yang², LI Zhao-hong², TIAN Shen²

(1. Naval Equipment Department, Beijing 100071, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Fighter jets and their equipped engines are inevitably threatened by enemy air defense weapons when performing missions on the battlefield, and terminal threats play a crucial role in causing damage. For different types of threats that engines (aircraft) may encounter during attack missions on the battlefield, analyses were focused on terminal threats' damage mechanisms. Starting from the damage mechanism of terminal threat output (threat mechanism), the output characteristics of common terminal threat outputs such as penetrators, fragments, incendiary materials, blast shock waves, high-energy lasers, and biochemical agents are described. On this basis, analyses were conducted on the types of threats faced by seven typical components of aircraft engines, and the potential damage modes that these threats may cause to each component are presented. The above threat analysis results can be used as a reference for engine and component vulnerability analysis, as well as for engine survivability or vulnerability design.

Key words: terminal threat; threat mode; damage mode; survivability; vulnerability; aeroengine

0 引言

航空发动机是飞机的关键和易损系统, 对战机整体生存力水平有着重要影响, 在某些方面甚至起着支配作用。随着现代航空发动机的转速、燃气温度和压力日益提高, 其作战生存力问题越发突出, 尤其是易损性问题。在战场执行任务时, 战机会不可避免地遭遇敌方防空武器的威胁。因此, 研究发动机的威胁作用机理和威胁模式, 对评估其损伤程度并指导其生存力设计具有重要意义^[1-2]。

美国早在 20 世纪 70 年代就建立了飞机生存力联

合机构 (Joint Aircraft Survivability Program Office, JASPO)^[3]; 在 20 世纪 70 ~ 80 年代到 2018 年, 先后完成了 F-4、A-7 和 AH-1 等多型飞机的实弹毁伤试验、F/A-18E/F 飞机机翼油箱爆炸 (水锤效应) 试验、以及 F-22 和 F-35 飞机的整机及部件毁伤试验^[4-5]。中国关于飞机生存力研究起步较晚, 仅从敏感性和易损性方面对生存力进行分析。李寿安等^[6]提出了影响飞机生存力的基本要素, 基于各因素对生存力的影响重要程度给出了评估飞机生存力的权重系数法和综合评估法, 并最终给出了飞机生存力/寿命周期费用综合权衡方法; 杨哲等^[7]针对实际作战中飞机主要受敌方导弹破

收稿日期: 2024-07-20

作者简介: 王春晖 (1968), 男, 硕士, 正高级工程师。

引用格式: 王春晖, 邢洋, 李兆红, 等. 航空发动机终端威胁作用机理和威胁模式分析[J]. 航空发动机, 2024, 50(4): 38-42. WANG Chunhui, XING yang, LI Zhao-hong, et al. Terminal threat mechanism and threat mode analysis of aeroengine[J]. Aeroengine, 2024, 50(4): 38-42.

片的威胁,提出了一种导弹破片威胁下的飞机易损性分析方法;李金瑞等^[8]通过计算分析,给出降低飞机易损性措施的建议,同时提出所存在问题的修改建议。目前在飞机生存力/易损性研究中,只是给出飞机所受威胁下杀伤概率的一些粗略评估方法和评估结果,还没有对发动机所受威胁作用机理和威胁模式的详细描述。

本文对飞机及发动机作战任务进行分析,介绍了航空发动机所面临的威胁模式,结合作战任务确定终端威胁作用机理和威胁模式,初步给出了相关威胁模式对各大部件可能产生的损伤模式。

1 飞机作战任务及面临威胁

飞机作战任务是指作战力量为达成预定作战目标而担负的任务。根据作战类型、作战样式、作战地位和作用、任务范围、任务方向和作战对象等因素的差异,作战任务也会发生相应变化。军用飞机主要用于执行一种或多种任务,如与其它飞机格斗、轰炸敌方地面目标或者向战场运输货物^[9-10]。

在战场执行攻击任务时,发动机(飞机)会遭遇不同类型的威胁。根据威胁效果不同,可以将其分类为非终端威胁和终端威胁2类。非终端威胁是指用于支持终端威胁元素的电子或光学系统,主要用于检测、预警、目标识别、目标跟踪、电子反对抗、火力与指挥控制、导弹制导和通信系统组成,目的是为终端威胁元素提供目标位置、随度和飞行方向等信息;终端威胁是指对空中目标起毁伤作用的军械物品,包括发射平台、发射设备,以及安装战斗部和相关损伤元素的威胁传播物。发动机面临的终端威胁通常是枪、炮、导弹,高功率激光和生化等武器^[11-13]。

由于非终端威胁本身并不具备施加损伤的能力,而终端威胁能够对空中目标造成损伤,影响发动机作战任务的完成。因此,本文重点对终端威胁作用机理和威胁模式开展分析。终端威胁包括发射平台、发射设备,以及安装战斗部和相关损伤机理的威胁传播物。对于航空发动机,通常可分为枪炮(弹丸)、战斗部、高能激光武器和生化武器4类,终端威胁元素如图1所示。

2 终端产物对发动机的作用机理

终端产物是指威胁类型对目标毁伤的最终毁伤

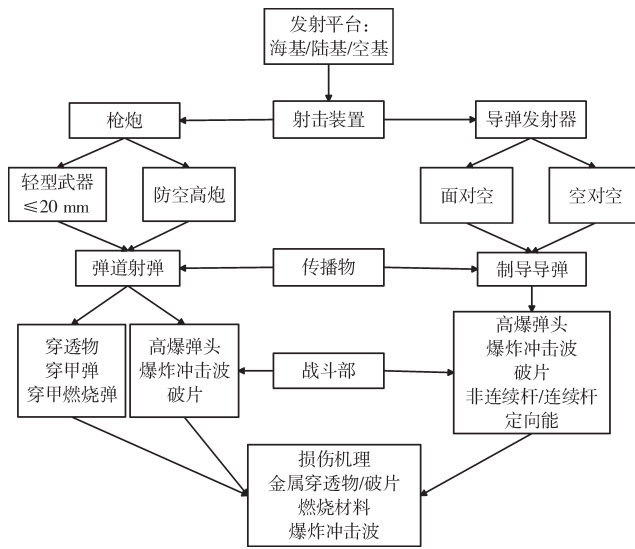


图1 终端威胁元素

元素。研究造成目标毁伤的特征是分析飞机发动机系统/部件战损形式的重要基础。从终端威胁产物杀伤机理(威胁机理)出发,对终端威胁产物的常见输出特性进行描述。常见终端威胁产物包括穿透物、破片、燃烧物质、爆炸冲击波、高能激光和生化制剂等^[14]。

2.1 金属穿透物和碎片

金属穿透物可以是穿甲弹弹芯、离散杆、连续杆、聚能射流、高爆战斗部爆炸形成的大块碎片。金属穿透物和碎片的主要损伤过程包括撞击和穿透固体和液压冲击导致的水锤效应。

穿透物对目标的撞击以及穿透被称为弹道冲击,这种现象与撞击和穿透一起构成了终点弹道学(或穿透力学)的一部分。固体的弹道冲击的2个主要损伤过程分别是撞击和穿透,具体撞击过程如图2所示。

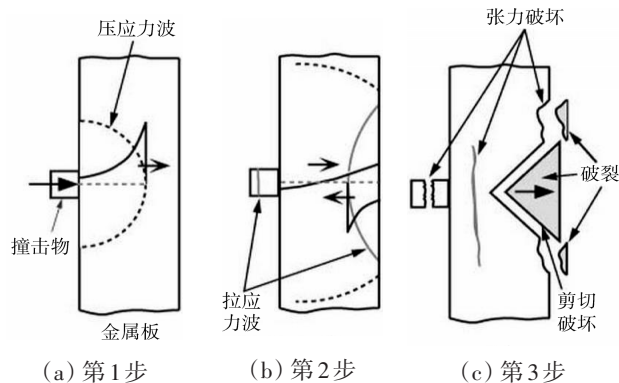


图2 撞击过程

穿透损伤过程是指穿透物完全穿透、形成穿孔或刺穿目标的情况。特定穿透物以一定的速度和角度

对给定板实施打击时,完全穿透的发生与否是1个随机事件。与撞击速度相关的穿透概率如图3所示。完全穿透的概率与每次撞击速度 V 相关,如“实际情况”的实线(图3)。

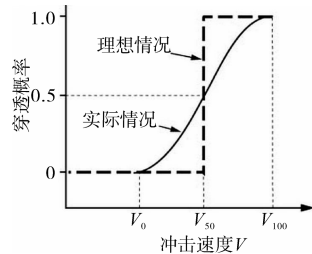


图3 与撞击速度相关的穿透概率

从图3中实线可见,当撞击速度较低时, $V \leq V_0$ 时,不会出现穿透现象,穿透概率为0;当撞击速度相当高时, $V \geq V_{100}$ 时,所有打击都将穿透,穿透概率为1;当速度在二者之间时,穿透概率在0和1之间。

2.2 燃烧物质

燃烧物质包括射弹或导弹战斗部中填充的化学试剂和易燃金属材料,目的是提高燃料和易燃蒸汽聚集空间内发生燃烧的可能性。轻武器射弹的燃烧物质位于弹芯的头部,靠与目标接触点燃;高爆战斗部中的燃烧物质在战斗部被引爆并炸离时点燃,以火花形式出现的次级燃烧物质能够通过金属碎片撞击飞机金属蒙皮产生。与燃烧物质相关的损伤过程是以起火或爆炸形式存在的燃烧。

(1)滑油燃烧。燃烧可能发生在发动机附件滑油箱滑油泄漏位置,由滑油系统受撞击而引起火险的可能性是比较小的。然而,如果滑油箱供油管漏油并被点燃,全部滑油箱滑油都可能被点燃。

(2)火舌效应。当燃烧室和加力燃烧室机匣受到打击并穿孔时,会造成不同面积大小的孔洞,穿孔的燃烧室会冒出炽热的火舌。燃烧室是发动机中温度和压力均最高的部件,喷出的火舌温度较高,同时长度较长,容易对围绕在机匣上的附件造成损伤。

2.3 爆炸冲击波

高爆弹药战斗部爆炸产生冲击对目标造成的压力负载称为爆炸冲击波负载,是与爆炸冲击波有关的损伤过程,是动压负载和超压负载的综合效应。对于大多数在目标外部引爆的战斗部来说,爆炸冲击波是次级损伤机理。除近距爆炸外,爆炸冲击波一般都是最后到达目标的损伤机理,它会叠加或增强其它损伤机理导致的损伤。当压力负载足以显著损伤发动机时,其它击中目标的损伤机理可能已经对目标实现了杀伤。

金属穿透物撞击铝制目标同样能产生冲击波。

打击速度为1000 m/s时,能够在撞击背面产生细碎的铝颗粒或汽化物,并迅速氧化,以光和热的形式辐射能量,这种现象被称为蒸发效应。若氧化发生在相对较小的封闭区域内,就会迅速加热这一区域的空气,对周围壁板和内部构件产生冲击波负载。高密浓度的传播物几乎同时打击某一铝质目标会产生大量的铝粉颗粒,这些粒子几乎同时氧化,产生的积累效应能引起非常高的内部超压。

2.4 高能激光

激光武器的特点是能量集中、传输速度快、命中精度高、转移火力快、抗电磁干扰强、并且能多次重复使用,但作战效费比高。激光武器主要由产生光源的激光器和具有跟踪、瞄准和发射作用的光束定向器组成。当激光武器作用于发动机时,其破坏机理是热破坏、力学破坏和辐射破坏。

2.5 生化制剂

生化制剂即生物战剂和化学制剂,通过施放装置作用于发动机,引起发动机不同形式的损伤。

(1)压气机的损伤。当生化制剂为液体时,液体吸入对涡轴发动机或涡喷发动机的压气机或对涡扇发动机高压压气机的影响是压气机机匣相对于转子会瞬间激冷和收缩,当吸入流被加温并蒸发汽化时,由于激冷使机匣的温度明显降低。机匣相对于转子的收缩导致叶尖摩擦并伴随着局部加热。因此,在设计选材时,应考虑涂层和叶尖间隙等方面。

(2)燃烧室的损伤。当生化制剂进入发动机燃烧室或加力燃烧室时,引起燃油污染,造成不稳定(湍流)燃烧,改变火焰特性,使得燃油效率降低,从而使发动机耗油率提高,也可能使发动机推力减小甚至停车。

(3)涡轮的损伤。当生化制剂含有矿物质和金属型颗粒时,可能会附着于叶片,形成沉积物,造成涡轮叶片不平衡。

(4)发动机附件的损伤。发动机附件中的电子设备在生化制剂作用失效(如短路)时,会影响附件功能。

3 终端产物对发动机的威胁模式^[15-17]

目前,军用飞机尤其是战斗机的发动机以涡扇发动机为主。典型的涡扇发动机包括风扇、压气机、燃烧室、涡轮机、后燃烧室、喷管和燃油、润滑油控制

装置。

3.1 风扇和压气机

涡扇发动机的风扇和压气机对于整台发动机来说具有较大的面积,对威胁机理的冲击较敏感。

(1)风扇和压气机筒体穿孔或变形。引起风扇和压气机筒体穿孔或变形的原因是穿透物或碎片穿过筒体,可能引起筒体变形或凹陷、或破坏风扇和压气机轮盘或叶片。破坏的轮盘或叶片可能以100 m/s以上的速度穿出筒体,撞击或穿透飞机附近部件,引起1个级联损伤。

(2)吸入燃油。靠近进气道的燃油油箱壁被穿透或者液压冲击损伤引起破裂,燃油随之进入发动机进气道。由击中而产生的碎片以及接近熔化的高能弹片产生的颗粒也常被吸入。吸入燃油后通常会引起压气机喘振、严重失速,在进气道和尾喷管内产生不稳定燃烧和或者发动机熄火。

(3)异物损伤。异物损伤由异物引起的,异物包含金属穿透物、碎片、来自飞机损伤部件的断片,这些异物进入发动机进气道,会损伤风扇和压气机叶片。这可能使得发动机失效或叶片抛出穿过发动机筒体,导致附近其它部件损伤。

3.2 燃烧室

燃烧室是发动机核心部件之一。现代发动机燃烧室机匣易烧穿或击穿,穿孔后会泄漏过多的燃气和喷射热气流。由于燃气泄漏,驱动涡轮的能量减少,发动机可能会发生故障和明显的推力损失。对于1个给定尺寸的穿孔,发动机增压比越大,燃气泄漏越多。因此,小口径弹丸或碎片从很大倾角打击造成的小穿孔也能引起处于高压的发动机故障和破坏性热气流喷射。如果击中高压燃油歧管和喷油管,会立即引起动力损失和失火。

3.3 涡轮

涡轮段是组成发动机目标面积之中较小的部件之一,回流式燃烧室为涡轮提供了一定遮挡。对涡轮打击会引起叶片损坏,接着导致高能碎片释放,机械干扰和卡滞,使涡轮机械失去平衡并遭受二次破坏(如由过度振动导致发动机安装失效)。

3.4 喷管和加力燃烧室

在发动机涡轮后的排气装置中,增加加力燃烧室可增大发动机推力,同时也提高了易损性。穿透物和碎片穿透、进入尾喷管可导致喷嘴燃油管路和作动机

构损伤,并导致燃油泄漏。如果飞机被击中时,推力增大装置正在运行,还可能引起二次起火。对于有燃油动力推力定航器的飞机,推力矢量控制管道和作动机构的穿透可能引起燃油泄漏和二次起火。如果这种杀伤模式导致飞行不可控,那么也可以归入飞行控制系统。

3.5 滑油和附件传动系统^[18-19]

发动机润滑系统包括滑油箱、油滤、供油泵、回油泵、管道、喷嘴和散热器。附件传动系统包括齿轮传动装置及机匣、起动机、泵和发电机等。所有润滑管路和部件都易击穿,穿孔后会引起滑油损失,造成轴承失效。对于威胁性较小的冲击会导致附件传动机匣因滑油泄漏或传动装置卡滞,从而发生故障。虽然滑油相对于燃油的着火危险较小,但并不能完全排除滑油着火的可能性。

4 总结

(1)根据航空发动机作战任务,获得非终端威胁和终端威胁的类型、种类、威胁模式,可为生存力分析提供威胁输入。

(2)从终端威胁产物杀伤机理(威胁机理)出发,根据终端威胁产物不同,对穿透物、破片、燃烧物质、爆炸冲击波、高能激光和生化制剂等常见终端威胁产物输出特性进行分析,进而对航空发动机7大部件遭受威胁模式开展分析,初步给出了相关威胁模式可能对各大部件产生的损伤模式。

上述威胁分析结果可供不同类型发动机及同类型发动机每一部件的易损性分析时借鉴,也可供飞机生存力或易损性设计参考。

参考文献:

- [1] Johnson J, Staley T. F-35: first-ever fixed wing full-up system level[J]. Aircraft Survivability, 2007, 12(3): 28-31.
- [2] Frankenberger C. F-35 live fire test: full-up systems level testing[J]. Aircraft Survivability, 2010, 28(1): 7-10.
- [3] Michael R. Weisenbach putting the joint in aircraft survivability[R]. AIAA-2003-1468.
- [4] 祖光然, 裴扬, 侯鹏. 飞机战伤抢修评估与设计方法综述[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 87-108.
ZU Guangran, PEI Yang, HOU Peng. Review of aircraft battle damage assessment and repair estimation and design technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 87-108. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [6] 李寿安, 张恒喜, 李曙林, 等. 飞机生存力评估与综合权衡方法研究[J]. 航空学报, 2005, 26(1): 23-26.
- LI Shouan, ZHANG Hengxi, LI Shulin, et al. Research on aircraft survivability evaluation and synthetic tradeoff methods[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(1): 23-26. (in Chinese)
- [7] 杨哲, 李曙林, 李寿安, 等. 导弹破片威胁下的飞机易损性分析[J]. 电光与控制, 2012, 19(12): 38-42.
- YANG Zhe, LI Shulin, LI Shouan, et al. Analysis of aircraft vulnerability to the fragments of a missile[J]. Electronics Optics and Control, 2012, 19(12): 38-42. (in Chinese)
- [8] 李金瑞, 李天, 王永庆. 军用飞机生存力研究中易损性分析[J]. 飞机设计, 2001, 21(2): 1-7.
- LI Jinrui, LI Tian, WANG Yongqing. The vulnerability analysis in aircraft survivability research[J]. Aircraft Design, 2001, 21(2): 1-7. (in Chinese)
- [9] 国防科技工业委员会. 飞机非核生存力通用指南: GJB/Z202-2001[S]. 北京: 国防科技工业委员会, 2001: 1-2.
- Commission of Science Technology and Industry for National Defense. General guide of nonnuclear survivability for the aircraft: GJB/Z 202-2001[S]. Beijing: Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 2001: 1-2. (in Chinese)
- [10] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构完整性大纲: GJB 775A-2012[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2012: 9.
- The General Reserve Department of PLA. Military aircraft structural integrity program: GJB 775A-2012[S]. Beijing: The General Reserve Department of PLA, 2012: 9. (in Chinese)
- [11] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构强度规范(第11部分)——结构生存力: GJB 67. 11A-2008[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2008: 1-13.
- The General Reserve Department of PLA. Military airplane structural strength specification (part 11) ——structure survivability: GJB 67. 11A-2008[S]. Beijing: The General Reserve Department of PLA, 2008: 1-13. (in Chinese)
- [12] 姚武文. 飞机战伤模式与机理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006: 55-56.
- YAO Wuwen. The mechanism and mode of aircraft combat damage[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006: 55-56. (in Chinese)
- [13] Robert E B. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design[M]. 2nd ed. Reston: AIAA, 2003: 1-6.
- [14] Robert E B. The Fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design[M]. New York: AIAA, 1985: 1-7.
- [15] David H H, Ronald M D, Michael S R. Unmanned aerial system survivability[R]. AIAA-2009-2401.
- [16] Thomas L W. New model to evaluate weapon effects and platform vulnerability[J]. WSTIAC Newsletter, 2001, 2(4): 1-3.
- [17] Angelo J K. The effect of component redundancy upon aircraft combat survivability[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1983.
- [18] Pei Y, Song B F. Aircraft vulnerable area decomposition method in the overlapping region of components[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(4): 1138-1144.
- [19] 邢洋, 杨怀丰, 刘亚君, 等. 舰载涡扇发动机高低温起动机试验与分析[J]. 推进技术, 2024, 45(1): 241-247.
- XING Yang, YANG Huaifeng, LIU Yajun, et al. High and low temperature starting test and analysis of carrier-based turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(1): 241-247. (in Chinese)

(编辑: 兰海青)