

飞机结构撞击损伤预测的现状与发展

张建华^{1,2}, 周平², 侯日立²

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 2. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

摘要:从弹道极限、剩余速度、剩余质量、未击穿及击穿条件下损伤尺寸预测等方面对飞机结构撞击损伤的预测进行了分析,并对损伤预测的发展趋势进行论述,提出今后损伤预测研究的主要方向和手段。

关键词:飞机结构;弹道极限;剩余速度;剩余质量;损伤形貌及尺寸

中图分类号:V21 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)05-0005-04

飞机结构战伤模式及战伤程度预测是制定战伤抢修预案及改进战斗生存力设计措施的前提和依据。西方军事强国历来十分重视该领域的研究,早在20世纪60年代,以美国为首的北约组织就通过高速打击实验获得了大量有效的数据,并建立了相关分析模型,编制了相关手册^[1-2]。我军在这方面起步较晚,对飞机战伤情况的了解还停留在抗美援朝战争有限的经验积累上,有效的损伤预测手段几乎还是空白。因此,开展飞机结构战伤预测研究是飞机战伤抢修及战斗生存力设计领域的当务之急。

对于某种具体的飞机结构,其战伤模式及程度主要取决于威胁源的特点。飞机面临的威胁种类很多,其中,射弹、导弹破片等外来物撞击是最具代表性的典型威胁方式之一。因此,研究飞机结构遭受撞击破坏的机理、预测其损伤程度,具有非常重要的现实意义。

1 弹道极限

飞机结构战伤预测中一般使用海军弹道极限标准,即弹丸完全穿过靶板所需的最低速度。通常用 v_{50} 表示,即完全贯穿概率为50%的着速。

1.1 Taylor 理论

针对锥形和卵形弹头弹丸造成的对称型塑性扩孔破坏,Taylor建立的弹道极限公式^[3]是 $v_{50} = \sqrt{2.66\pi T\sigma_y D^2/4m_p}$ 。式中: T 为靶板厚度; D 为弹丸直径; m_p 为弹丸质量; σ_y 为屈服极限。该理论将靶板作为一块无穷大的弹性-完全塑性薄片,将弹体运动作为准静力的轴对称扩孔来处理^[4]。在工程上,可在靶板塑性良好、硬度较低的情况下考虑使用Taylor理论。

1.2 Thomson 理论

针对锥形弹丸造成的呈筒形弹孔破坏模式,Thomson提出的弹道极限为 $v_{50}^2 = \pi D^2 T\sigma_y (1 + D^4/32kH^2)/4m_p$,式中 $k = m_p/\pi\rho_l T$; H 为筒壁高度。对于卵形弹头弹丸 $v_{50}^2 = \pi D^2 T\sigma_y/4m_p$ 。该理论适用较薄($D/T \approx 16$)的韧性靶板。

飞机蒙皮、壁板等材料一般具有较好的塑性,当其遭受子弹、穿甲弹等非爆炸性射弹撞击时容易产生扩孔和筒形破坏,因此可用上述理论进行分析。

1.3 钝头弹体对薄靶板挤凿破坏模型

Recht和Ipson关于刚性钝头弹体对薄靶板挤凿破坏的理论^[5]认为: $v_{50} = 4\Omega T^2\psi\eta$

收稿日期:2004-03-17

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:张建华(1962-),男,陕西宝鸡人,教授,博士生,主要从事飞机战伤修理研究。

$\{1 + [(L + \Omega T)(1 + d/4\rho_i T \eta \psi^2)/\Omega T]\}/Ld$ 。式中: $\psi = (\rho_p C_{ep} + \rho_t C_{et})/\rho_p C_{ep} \rho_t C_{et}$,其中 C_{ep} 和 C_{et} 分别是撞击体和板中的声速, η 是有关板料的动力剪切强度的函数,假设它是常数,并具有应力量纲。该公式在撞击体变形不太严重的条件下是相当成功的。实验表明:飞机结构遭受导弹破片高速撞击时基本上是以冲塞形式破坏,因此,可借鉴该理论进行分析。

1.4 纤维复合材料结构的弹道极限经验公式

复合材料的损伤研究主要以实验为主。如美国针对飞机结构冲击损伤容限设计曾进行过紧凑中等钢碎片冲击到石墨/环氧层压板上的试验,建立了如下预测模型^[5]: $v_{50} \cos \theta = 3925 (\rho_i TA_p/m_f)^{1.58}$ 。式中: ρ_i 为层压板密度, T 为板厚, A_p 为破片平均迎风面积。这一模型基本上可满足工程精度的要求,对于不同的复合材料需要通过试验确定式中的常数项和指数项。

1.5 金属结构的弹道极限经验公式

预测金属结构弹道极限,目前已有较多有效数据和成熟分析方法^[6],如 JTCC/ME 贯穿公式可预测某些战斗部破片打击铝合金、钛合金和钢板等的弹道极限。文献[7]、[8]分别给出 $v_{50} = \{[c(\rho_p TA_p/m_f)^b] + K\}/\cos \theta$; $v_{50} = 10^{c_1} (TA)^{a_1} m_p^{b_1} (\sec \theta)^{\gamma_1}$ 。式中: c 、 b 、 K 为经验常数; A 为破片在垂直速度矢量平面上的投影面积; m_p 为破片重量。此外,近年来有不少用经验法、分析方法、数值计算方法研究具体类型弹丸和撞击条件下的弹道极限的报道,如球形弹丸贯穿有限厚板、杆状破片穿透 A3 钢板、子弹垂直侵彻陶瓷/铝合金靶板等^[7-11]。

2 剩余速度和剩余质量

2.1 剩余速度

2.1.1 理论模型

Thomson 理论分别给出了锥形弹丸式(1)、卵形弹头弹式(2)撞击时的剩余速度

$$v_r^2 = \frac{k_1^2 V_0^2}{(k_1 + D^4/H^2)^2} - \frac{\sigma_Y D^2 (2k_1 + D^4)}{\rho_i (2k_1 H^2 + 2D^4)} \quad (1) \quad v_r^2 = v_0^2 - \frac{\pi D^2 T}{4m_p} \left[\sigma_Y + \frac{3}{8} \pi^2 \rho_i \left(\frac{v_r D}{2H} \right)^2 \right] \quad (2)$$

花瓣型击穿的 Zaid - Paul 动量理论中,剩余速度的计算式为 $v_r = v_0/[1 + \pi \rho_i T \sin \beta (D/2)^2/m_p]$ 。实验表明,存在一个临界速度 v_{cr} ,当速度小于 v_{cr} 时,发生花瓣型击穿,而速度大于 v_{cr} 时,则发生冲塞^[12]。速度在 500 m/s 左右以上时,Paul - Zaid 动量理论较 Thomson 理论更合实际。

Recht 理论也得出了关于钝头弹丸冲塞破坏和尖锐弹头穿透靶板的剩余速度: $v_r = m_p (v_0^2 - v_{50}^2)^{1/2}/(m_p + m_i)$; $v_r = (v_0^2 - v_{50}^2)^{1/2}$ 。式中: m_i 为塞块质量, v_0 为弹丸初速。该公式与实验吻合很好,在实际应用时 m_i 不好确定,常用 $\pi D^2 h \rho_i/4$ 计算。对于凿离靶板时偏角的计算,假设弹丸和塞块在离开靶体时方向相同,速度也相同,则 $\sin 2\beta = (v_{50}/v_0)^2 \sin 2\beta_{50}/[1 + (1 - v_{50}^2/v_0^2)^{1/2}]$ 其中, β_{50} 为在弹道极限时弹体的偏角, β_{50} 需由实验确定,这给该公式的使用带来不便。

除此之外,韦泊尔模型等也可以估算弹丸贯穿靶板后的剩余速度^[13]。

2.1.2 经验公式

米赛等于 1976 年从试验数据得出弹体穿透靶体后的剩余速度 v_r 为

$$V_f = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_{n0} \leq v_{n50} \\ B_4 (v_{n0}^{b_3} - v_{n50}^{b_3})^{1/b_3}, & v_{n50} \leq v_{n0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $b_3 > 1, 0 \leq B_4 \leq 1$ 。此外,根据对软钢、杜拉铝、防弹玻璃和胶质玻璃进行实验收集到的剩余速度数据,推导出预测破片剩余速度的关系式^[3]是 $v_r = v_i - k(TA)\alpha(m_f)^\beta (\sec \theta_c)^\gamma v_i^\lambda$,其中 k, α, β, γ , 和 λ 是根据每种材料特性分别确定的系数; A 为破片平均着靶面积。

2.2 剩余质量

剩余质量研究比较成熟的有 Recht - Ipson 动量平衡理论。该理论对冲塞形式提出了两种分析模式,当 $v > C_p$ (C_p 为弹体中塑性波波速) 时,适合飞机薄壁结构分析。根据该理论,弹丸剩余质量为 $m_r = m_i \exp[-\lambda(1/Z^* - C_p^2/v_0^2)]$ 。式中: $\lambda = \rho_p v_0^2/2\sigma_{yD}$, $Z^* = 1 + \rho_p C_p/\rho_i C_i$ 。此外,还有些适用范围较广的经验公式,如: $m_p - m_r = 10^{c_2} (TA)^{a_2} (m_f)^{\beta_2} (\sec \theta_c)^{\gamma_2} v_i^{\lambda_2}$ 。式中: m_r 为弹丸穿透目标后的剩余质量; $c_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ 和 λ_2 是

根据每种材料确定的常数。

3 损伤形貌及尺寸

根据损伤程度不同,损伤可分击穿和未击穿两种情况讨论。

3.1 未击穿时结构的损伤

当弹丸不能击穿飞机结构时,从飞机战伤抢修角度主要需分析它对结构造成的最大变形深度。关于这方面的研究成果,主要有 Calder - Goldsmith 能量理论、理想塑性和硬化塑性靶板理论、弹性粘塑性靶板大挠度理论^[14-15]。其中能量理论给出了最大变形深度 ω_0 的计算: $\omega_0^4 + 16Y\omega_0^2/E_1 - 32m_p v_0^2 \sqrt{1-\mu + \mu^2}/E_1 \pi h = 0$ 式中; Y 为靶板材料屈服极限; E_1 为应力应变曲线塑性段的切线模量; μ 为泊松比。该理论适用于弹塑性和硬化塑性薄板结构。

3.2 击穿时靶板的损伤尺寸

靶板被穿透时,损伤效应有多种评估方法,比较常用的是最大破坏尺寸。即包含弹孔、裂纹、崩落的最大尺寸。由于问题的复杂性,预测最大破坏尺寸主要采用实验手段。根据撞击物的特点,研究结果分为射弹撞击损伤和破片撞击损伤两大类。

3.2.1 射弹对靶板损伤的预测

射弹对结构损伤的预测可按结构材料不同分金属和复合材料两种情况讨论。

当靶板为金属材料时,成熟的理论有 LATDAM 等^[4,16]。LATDAM 是美军针对飞机结构材料和飞机面临的主要威胁源特点,通过大量实弹打击试验,综合形成一个适用于小型武器冲击物冲击到金属板上时的损伤尺寸预测模型,主要用于预测弹丸毁伤尺寸的上限和下限。其计算公式如下:

$$L_{\max} = \begin{cases} 0, & v^* < v_1 \\ k_\theta L_v [\alpha_4 v_1^4 + \beta v^3 + \gamma_4 v^2 + \delta_4 v] & v_1 \leq v^* \leq v_3 \\ L_h & v^* > v_3 \end{cases}$$

式中: $v^* = v[\cos\theta]^{0.7}$, $v = (v^* - v_1)/(v_3 - v_1)$, L_{\max} 为最大毁伤尺寸, L_v 、 L_h 分别为垂直撞击的毁伤尺寸和高速损伤尺寸,是 t/d , 目标材料、弹丸类型的函数; α 、 β 、 γ 、 δ 为常数,依赖于最大毁伤点和高速毁伤点的坐标; k_θ 为斜击的修正系数,是 θ 、 t/d 、目标材料和弹丸类型的函数。

当结构材料为纤维复合材料时,损伤形式比较复杂。主要有在实验基础上建立起来的适应入口处损伤尺寸 L_{Den} 、出口处损伤尺寸 L_{Dex} 预测的模型^[14,7]: $L_{Den} = L_p/\cos\theta + 5.08$; $L_{Dex} = L_{Dex} [0.95 + 0.57(t/L_p) + 0.63(t/L_p)^2 + 0.14(t/L_p)^3]$ 。式中: L_p 表示最大有效长度; θ 表示倾斜角,即飞行路径与目标物表面法线之间的夹角。

上述公式是针对美国的飞机结构材料和威胁源特点总结出来的,是否适用于我军情况还需要实验验证。

3.2.2 破片对结构损伤的预测

文献[7]提出用于预测高速破片对结构损伤尺寸预测分析模型为 $L_D = L_p [1.16 + 0.6(t/L_p)^2]/\cos\theta$ 。式中: L_D 是横向损伤尺寸; L_p 是冲击碎片前沿最大尺寸; θ 是倾斜角,即飞行路径与目标物表面法线之间的夹角; t 是目标物厚度。该公式主要用于导弹特别是地对空导弹爆炸散射的低密度破片造成的损伤尺寸。低速破片对靶板损伤尚需进一步研究。

破片对纤维复合材料靶板的损伤预测可以用与射弹相同的模型。

4 结束语

综上所述,目前飞机撞击损伤预测的研究一方面取得了许多令人鼓舞的研究成果,但另一方面,也应注意到现有研究成果大多是针对具体应用对象的一些典型情况得出的。因此,不论是撞击物种类、飞机结构材料类型还是撞击物与飞机结构的交会条件,都有较大局限性。因此,今后的研究中应注意如下问题:

1) 由于我国在损伤预测领域的研究还很薄弱,因此,首先应充分吸收现有研究成果,为我所用。即广泛开展应用性研究,修正现有分析模型,使之适应我军装备特点,从而迅速提高我军飞机战伤抢修及战斗生存

力设计水平。

2) 加强基础性研究。目前,诸如不规则形状弹丸、偏航角不为零时的撞击问题研究得还不多,至于旋转弹丸(如射弹)的撞击问题的研究则更少,因此,从机理上研究诸如复杂形状撞击物、复杂飞机结构、任意交会条件下的撞击损伤问题是损伤预测研究领域不可回避的课题。

3) 从撞击损伤分析研究手段的发展趋势看,应加强数值仿真研究。目前的研究方法主要是通过试验,提出经验公式,这就使得应用范围受到限制,难以推广到不同的撞击情况。由于问题的复杂性,尽管在今后相当一段时间内仍将以实验研究为主,但要获得更经济、应用范围更广泛的结论,最根本的出路还是数字模拟分析手段。

参考文献:

- [1] SURVIAC. Aircraft Battle Damage Repair, A Survey of Actual Combat Experience[R]. AFWAL - TR - 86 - 3064, 1986.
- [2] Holcomb D H. Aircraft Battle Damage Repair for The 90's and Beyond[R]. ADA278635, 1994.
- [3] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [4] Taylor G I. The Formation and Enlargement of A Circular Hole in A Thin Plastic Sheet[J]. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1948, (1): 103 - 124.
- [5] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1992.
- [6] Avery J G, Burch G T. An Aircraft Structural Combat Damage Model[R]. AFFDL - TR - 70 - 115.
- [7] 郑旻仲,付祥炯. 军用飞机结构高生存力设计指南[M]. 西安:中国飞机强度研究所,2000.
- [8] 林光宇,顾国忠. 面对空武器系统对飞机的威胁分析[R]. 北京:中国航空工业总公司科技局,1999.
- [9] 王晓鸣,娄国伟,魏惠之,等. 球形弹丸贯穿有限厚靶板的极限速度[R]. GF82306, 1991.
- [10] 胡景林,张运法. 杆状破片对 A3 钢板的极限穿透速度研究[J]. 弹道学报, 2001, 13(2): 18 - 22.
- [11] 杜忠华,赵国志. 子弹垂直侵彻陶瓷/铝合金靶板的理论分析模型[J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 477 - 480.
- [12] 王儒策,赵国志. 弹丸终点效应学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.
- [13] Clark D. 估算弹丸贯穿靶板时的残余速度和临界速度的韦泊尔模型[R]. GF46497, 1982.
- [14] 崔秉贵. 目标毁伤工程计算[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
- [15] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [16] Harper N F. Design Manual for Impact Damage Tolerant Aircraft Structure[R]. ADA109290, 1981.

(编辑:姚树峰)

The Actualities and Development of Impact Damage Forecast for Airplane Structure

ZHANG Jian - hua¹, ZHOU Ping², HOU Ri - li²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China; 2. The First Aviation Institute of Air Force, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: The impact damage forecast for the airplane structure has great significance for ABDR. This paper analyzes the impact damage forecast for the airplane structure from the following four aspects: ballistic limit, residual velocity, residual mass, forecast of damage size in structure penetrated or not penetrated, simultaneously discusses the development tendency of damage forecast and finally points out the main direction and means in the future damage forecast research.

Key words: airplane structure; ballistic limit; residual velocity; residual mass; damage shape and size