

射弹侵彻飞机 LY-12CZ 板材的实验研究

周平¹, 张建华², 侯日立²

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264000; 2. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

摘要:利用普通枪械加速 7.62 mm 弹丸,对飞机结构材料 LY-12CZ 在射弹打击下的损伤规律进行了实验研究,结果表明:损伤尺寸服从正态分布;损伤尺寸与弹丸着角的余割值成线性关系。同时讨论了损伤模式及机理,参照 LATDAM 提出了 LY-12CZ 损伤尺寸的预测模型。

关键词:射弹;靶板;撞击;战伤预测

中图分类号:V21 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)01-0027-04

飞机在遂行对地攻击任务时,容易受到地面轻武器的攻击。早在 20 世纪 60 年代,为了给飞机战斗生存力设计和战伤抢修预案研究提供依据,以美国为首的北约组织利用轻武器对飞机结构用板材进行了大量的打击实验,建立了射弹对飞机结构的战伤预测模型^[1-4]。其中,LATDAM 模型为最具实用价值的研究成果^[5]。由于我国飞机结构形式及材料与美国有较大区别,不能完全套用美国经验公式,有必要开展针对性更强的研究工作。为此,本课题针对我军飞机结构主要用材——LY-12CZ,利用 7.62 mm 射弹进行打击实验,对该材料在射弹撞击下的损伤模式、最大损伤尺寸分析模型进行了探讨。

1 实验方案

利用厚度 1.5 mm 的 LY-12CZ 板材,加工成 300 mm × 200 mm 的试件(长度方向与材料压延方向一致),四边固定,材料性质见表 1。选用两种不同形状和质量的弹丸(有关数据见表 2),分别在 847 ~ 909 m/s, 305 ~ 390 m/s 和 0°、15°、30°、45°、60°斜角下进行打击试验。弹靶之间的距离和角度通过调节靶板得到。弹丸加速采用普通军用枪械,通过在空气中速度衰减获得不同弹速。具体实验条件及结果见表 3。

表 1 LY-12CZ 物理和机械性质

E/GPa	HB/MPa	Y/MPa	G/MPa	σ_b /MPa	τ_0 /MPa	ρ /(kg/m ³)	$T_{\text{熔}}/^{\circ}\text{C}$
72	700	310	2.7×10^4	420	250	2 780	660

表 2 弹丸数据

弹丸类型	弹丸重/g	弹丸长/mm	弹丸直径/mm	口径/mm	初速/(m/s)
I	7.75 ~ 8.05	26.8	7.92	7.62	920
II	5.5	14	7.85	7.62	420

2 实验结果分析

2.1 损伤模式分析

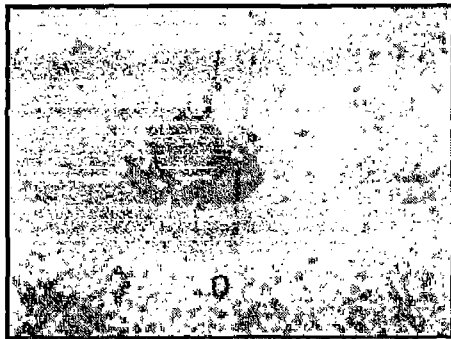
实验表明,对于两种具有相同外径但形状、质量各不同的弹丸,对靶板造成的损伤形貌基本一致,在本实验条件下,冲击速度对损伤模式无明显影响。其损伤特点为:形状比较规则对称,上表面有明显的塑性凹陷

收稿日期:2003-10-23

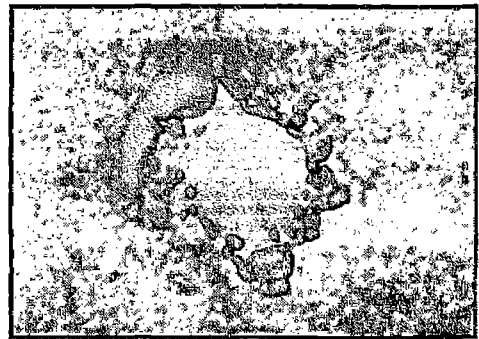
基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:周平(1979-),男,湖南永州人,硕士生,主要从事飞机修理研究;
张建华(1963-),男,陕西宝鸡人,教授,主要从事飞机修理研究。

区,穿孔绝大多数为圆形,孔边分布着数个长短不一的裂纹。入口处有材料轻微堆积现象,略带烧焦痕迹。下表面隆起,呈明显的花瓣状损伤(见图1, I号弹丸,速度909 m/s);斜击时损伤尺寸明显增大,且花瓣基本上集中在同一侧(见图2, II号弹丸,速度366 m/s)。对比试验前后靶板的质量,发现有质量损失,每一弹孔平均损失0.017 g,相当于直径2.74 mm的靶板,因此,应该同时有冲塞现象发生。塞块直径约为 $0.36d$ (d 为弹丸直径)。



(a) 靶板正面

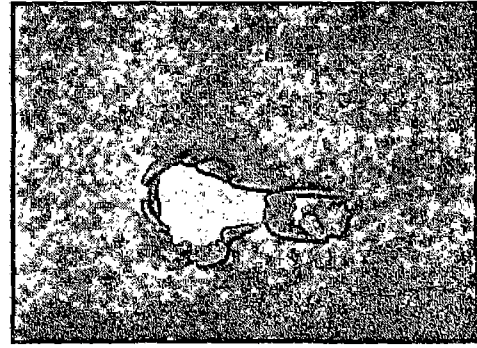


(b) 靶板背面

图1 垂直撞击



(a) 靶板正面



(b) 靶板背面

图2 斜击

表3 部分试验结果数据

序号	$\theta/(^{\circ})$	$V/(m/s)$	L/mm	序号	$\theta/(^{\circ})$	$V/(m/s)$	L/mm	序号	$\theta/(^{\circ})$	$V/(m/s)$	L/mm
1	0	909	11.78	20	0	847	11.60	39	0	372	12.44
2	0	909	10.82	21	0	847	12.74	40	0	366	12.60
3	0	909	12.30	22	0	847	11.04	41	0	366	10.96
4	0	909	12.30	23	0	847	11.84	42	0	366	11.08
5	0	909	10.96	24	0	847	12.44	43	0	366	12.40
6	0	909	11.63	25	0	847	11.90	44	0	366	13.40
7	15	909	11.88	26	0	390	12.72	45	0	355	11.94
8	15	909	12.70	27	0	390	11.76	46	0	355	11.38
9	15	909	11.98	28	0	390	12.06	47	0	355	11.74
10	30	909	11.38	29	0	384	11.46	48	0	355	12.64
11	30	909	10.30	30	0	384	12.04	49	0	355	11.40
12	30	909	10.70	31	0	384	12.20	50	0	345	12.00
13	45	909	13.16	32	0	378	12.26	51	0	345	12.40
14	45	909	12.88	33	0	378	11.86	52	0	345	12.10
15	45	909	16.42	34	0	378	11.90	53	0	345	12.06
16	60	909	15.66	35	0	372	11.44	54	0	305	11.84
17	60	909	15.52	36	0	372	12.40	55	0	305	10.82
18	60	909	14.82	37	0	372	11.28	56	0	305	12.90
19	0	847	11.48	38	0	372	11.98				

射弹撞击 LY-12CZ 造成的这种由花瓣扩孔、冲塞、径向裂纹等三种基本形式组合的复合型损伤,主要是由靶板材料性质和射弹几何特性决定的。本次实验采用的射弹外形为小锥度截顶锥形。其较小的锥度,有助花瓣扩孔模式的形成,而截顶有助于形成冲塞模式。自然时效状态的 LY-12 铝板既有脆硬的一面,又

具有一定的塑性,为这种复合型损伤模式的形成提供了有利条件。

2.2 损伤尺寸预测

对于相同材料、相同结构,弹丸对飞机结构的损伤主要与如下三个因素有关:弹丸的质量、形状和机械力学性质等;靶板的厚度、质量和机械力学性能等;弹丸与飞机结构的交会条件(如弹速、着角等) [6]。

2.2.1 弹丸形状及质量对损伤尺寸的影响

通过对实验结果分析可知,外径相同,形状、质量不同的两种弹丸对飞机结构造成的损伤尺寸期望值分别为 11.767、11.994,二者相差很小。现将 I、II 号弹丸垂直撞击靶板后造成的损伤尺寸分成 A、B 两组,进行秩和检验: $n_A = 13, r_A = 238, E(R_A) = 292.5, D(R_A) = 1511.25$, 如两组数据来自同一分布总体,则近似有 $R_A \sim N(292.5, 1511.25)$, 拒绝域为 $\frac{|R_A - 292.5|}{\sqrt{1511.25}} \geq z_{0.025} = 1.96$, 现在 R_A 的观察值 $r_A = 292.5$, 拒绝域为

$1.402 \leq 1.96$, 故可在 0.05 水平下认为两组数据来自同分布总体,即在本实验条件下,弹丸的形状及质量对靶板的损伤尺寸无显著影响。

2.2.2 速度对损伤尺寸的影响

损伤尺寸 L 与射弹冲击速度 V 的关系见图 3。从图中可以看出,在本次实验条件下,尽管弹丸速度相差很大(305 ~ 909 m/s),但损伤尺寸大小相差却波动很小,基本上是在 11 mm 到 12.5 mm 之间,均值为 11.915,方差只有 0.309。为了研究损伤尺寸的分布规律,将全部损伤尺寸数据分成 6 组做出频率直方图,见图 4。现假设损伤尺寸服从正态分布, χ^2 检验如下: μ, σ^2 的极大似然估计值分别为 11.915, 0.309; 依据每个 np_i 都不小于 5 的原则,合并两组,因此共 5 组; $\chi^2 = 0.0406 + 0.4278 + 0.421 + 0.0866 + 1.3015 = 2.2775 \leq 2.773 = \chi_{0.25}^2(5 - 2 - 1)$, 因此,可在水平 0.25 接受假设,可认为损伤尺寸服从正态分布。在实际应用中,通常关心的是一定置信度下的损伤尺寸预测结果,在本课题中,取 95% 的置信度,由此得到的损伤尺寸分布区间为 (10.820, 12.826)。

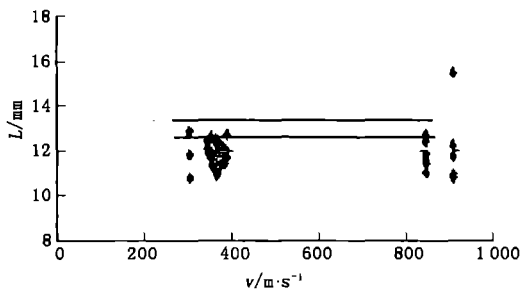


图 3 L 与 V 的关系

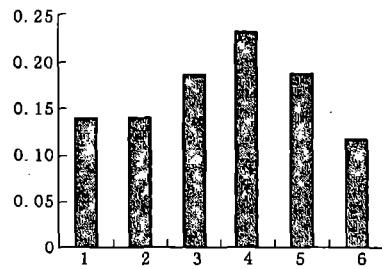


图 4 损伤尺寸频率直方图

2.2.3 着角对损伤尺寸的影响

损伤尺寸 L 与着角的余割 ($\sec \theta$) 成线性关系。本实验结果中涉及着角的数据为表 3 中 1 ~ 18 号,其中 L 与 $\sec \theta$ 的关系见图 5。利用最小二乘法,计算得 $r_{xy} = 0.673$ 。查表知,当观测次数为 18 时, $r_{0.01} = 0.4683, r_{xy} > r_{0.01}$, 可见 L 与 $\sec \theta$ 的相关性很好,其关系可用线性回归方程表示为 $L = 8.3712 + 3.5226 \sec \theta$ 。

2.2.4 损伤尺寸预测模型

由上述分析可知,在本实验弹丸速度范围内,靶板的损伤属于高速毁伤阶段,损伤尺寸与弹丸速度变化基本无关。对此条件下损伤尺寸的计算可参照 LATDAM 模型来处理。根据 LATDAM,弹丸对靶板高速毁伤的尺寸上限为 $L_{\max} = d [c_3 + 0.6 (t/d)^2]$, 下限为 $L_{\min} = 0.75 L_{\max}$, 其中 t 为板厚, d 为弹丸直径, c_3 为常数 [7]。LATDAM 模型中的常数是在靶板材料为美国军用飞机材料的条件下确定的,在该模型中,只针对美军飞机结构材料 2024、7075-T6、6Al-4V 三种材料提供了 c_3 的取值。

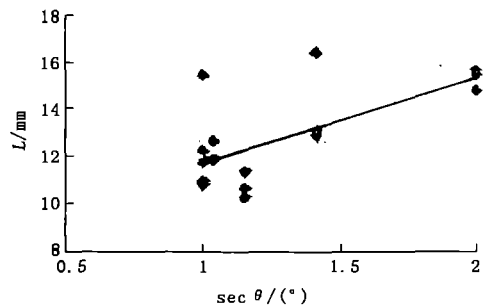


图 5 L 与 sec θ 的关系

将 2.2.2 分析的损伤尺寸上、下限值 10.820, 12.826 代入,算得: $c_3 = 1.66; L_{\min} = 0.84 L_{\max}$

在 LATDAM 模型中,斜击时用 k_θ 直接修正 L_{\max} , 或根据弹丸尺寸和适用的模型修正 k_p 常数。而

LATDAM 只有计算 2024、7075 - T6、6Al - 4V 的 k_θ 值所需的参数。从 2.2.3 分析可知 L 与 $\sec \theta$ 成线性关系, 同样, (L/L_0) 也应该与 $\sec \theta$ 成线性关系, 经计算得到其相关系数 $r_{xy} = 0.765\ 587$, $r_{0.001} = 0.708\ 4$, $r_{xy} > r_{0.001}$, 证明相关性很好, 线性回归方程为 $(L/L_0) = 0.682\ 2 + 0.286\ 9 \sec \theta$ 。该表达式反映了着角对损伤尺寸的影响, 式中 L_0 则与材料的相对厚度 (t/d) 有关。综合考虑飞机结构及撞击条件的影响, LATDAM 可修正为 $L_{\max} = (0.682\ 2 + 0.286\ 9 \sec \theta) d [0.308 + 0.6(t/d)^2]$; $L_{\min} = 0.9 L_{\max}$ 。

3 结束语

上述研究表明, 由于我国飞机结构形式、材料特点及面临的威胁源不同, LATDAM 不能完全满足我国飞机结构材料 LY - 12CZ 战伤预测研究的需要, 而利用实验结果提出的损伤模式、类型及损伤尺寸上下限, 具有更好的适用性。

参考文献:

- [1] Avery J G, Burch G T. An Aircraft Structural Combat Damage Model[R]. AFFDL - TR - 70 - 115, 1970.
- [2] Avery J G, Porter T R, Lauze R W. Structural Integrity Requirements for Projectile Impact Damage - An Overview[A]. AGARD Conference Proceedings, 1976.
- [3] SURVIAC. Aircraft Battle Damage Repair, A Survey of Actual Combat Experience[R]. AFWAL - TR - 86 - 3064. 1986.
- [4] Holcomb D H. Aircraft Battle Damage Repair for the 90's and Beyond[R]. ADA278635, 1994.
- [5] 崔秉贵. 目标毁伤工程计算[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995.
- [6] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [7] Harpur N F. Design Manual for Impact Damage Tolerant Aircraft Structure[R]. ADA109290, 1981.

(编辑: 姚树峰)

Study of Battle - Damage Prediction Mode of Aircraft Structure Material LY - 12 CZ with Projectile

ZHOU Ping, ZHANG Jian - hua, HOU Ri - li

(1. The Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai, Shandong 264000, China; 2. The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: The damage rule of aircraft structure material LY - 12 CZ with projectile is tested and investigated by accelerating the 7.62 mm pill with the ordinary gun. Through the analysis of the experimental results, the conclusion shows that there is a linear relationship between the damage size and the cosecant value of pill velocity angle; the damage size is distributed in normal school. Simultaneously the damage mode and the mechanism are analyzed, and then a battle - damage degree forecast experimental model of LY - 12 CZ is put forward in the light of LATDAM.

Key words: projectile; target; impact; battle - damage prediction