航空头盔典型件冲击保护性能实验研究[1)]

陈作荣 杨宜谦 马和中
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要 利用分离式 Hopkinson 压杆研究了几种航空头盔典型件的冲击保护性能,测量了各构件的能量吸收率. 讨论了冲击过程和能量吸收过程,进一步分析了头盔外壳材料力学性能及泡沫衬垫密度对头盔能量吸收率的影响规律. 实验表明,在一定范围内外壳力学性能和泡沫衬垫密度对于能量吸收起着重要作用. 为设计新一代航空头盔提供了可靠的实验依据.

关键词 冲击 (力学); 霍布金生杆; 颅骨; 航空头盔; 能量吸收率
分类号 V 244.3; O 347.1

航空事故中头部损伤问题一直受到普遍关注. 随着 50 年代航空头盔的普遍使用以来,航空事故中头部损伤事件发生率比以前减少了一半,这在当时是非常令人注目的[1],但是当今头部损伤仍然是航空事故中的一个重要问题. Shanahan[2] 指出:这主要是由于现代战争要求战斗机飞行速度更快、机动性、灵活性更高,飞行动作难度增大,这些都使得飞行员在飞行过程中,头部和机舱界面接触和冲击的可能性增大,冲击力也增大. 为此,各国都竞相研制新型的高性能保护头盔,我军新型战斗机种也迫切需要相应的飞行保护头盔.

随着冲击动力学及预防头部损伤学的发展,人们对头部冲击损伤的类型与机理的认识逐渐深刻,研究结果表明:提高航空头盔的能量吸收能力,可以显著改善其冲击保护性能,进而减少头部冲击损伤. 因此,能量吸收率便成为航空头盔防护性能的重要指标之一.

航空头盔冲击实验的目的是为了准确模拟在可生存的撞击事故中可能发生的戴头盔的头部冲击,并测量该环境下头盔的能量吸收能力. 目前,测量头盔冲击保护性能所广泛采用的实验装置主要为落头式冲击实验台和摆头式冲击实验台两种. 它们都比较简单、易操作,但是,它们有一共同的缺点:只能粗略获得最终结果,而对于测量整个冲击过程中一些主要参量,如冲击力、能量吸收率等对时间的变化规律则很困难甚至无能为力,而这些信息对于了解头盔的冲击破坏过程和揭示其破坏机理来说却至关重要. 此外,它们采用铝合金或镁合金头型模拟人头,其动力学响应与真实人头的响应相差甚远,而且其几何外形也与真实人头有一定差别,这些都使其结果误差较大.

本实验利用 Hopkinson 压杆装置作为测试手段,克服了以上两种方法的缺点,完整地检测了整个冲击过程,仔细研究了各主要参量随时间的变化规律,进一步研究了不同撞击杆速对头盔典型件的破坏形式及能量吸收率的影响. 并且,还利用人头颅骨置于头盔中,力求使实验结果更加可靠.

1 实验原理及方案

实验装置如图 1 所示. 实验中颅骨底部磨平,内衬一气囊,压强约为 1.2 个大气压,模拟颅压,用 502 号胶把颅骨与环氧玻璃钢平板粘合.

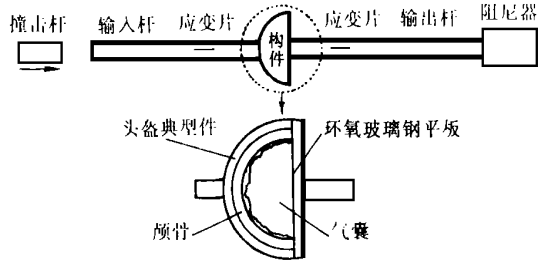


图 1 实验装置示意图

本实验所用头盔典型件由航空工业总公司 510 厂提供. 试件分 3 种外壳材料、3 种衬垫密度及有无海绵,共 18 种,每种试件均进行 3 次实验,实验数据经处理后,取其平均值作为实验结果.

实验中撞击杆以一定速度撞击输入杆,输入杆中产生应力波,当该应力波到达右端时,其中一

收稿日期: 1996-09-02 第一作者 男 26 岁 博士生 100083 北京
1) 航空科学基金资助项目

部分能量被反射回输入杆, 另一部分则传递给实验构件及输出杆. 根据一维弹性波理论[3], 设 $\varepsilon_I(t)$、$\varepsilon_R(t)$、$\varepsilon_T(t)$ 分别为输入杆中的入射波应变、反射波应变及输出杆中的透射波应变, 则

入射波能量:

$$E_I(t) = ESc_0\int_0^{t_I}\varepsilon_I^2(t)\,dt \qquad (1)$$

反射波能量:

$$E_R(t) = ESc_0\int_0^{t_R}\varepsilon_R^2(t)\,dt \qquad (2)$$

透射波能量:

$$E_T(t) = ESc_0\int_0^{t_T}\varepsilon_T^2(t)\,dt \qquad (3)$$

实验构件吸收的能量:

$$E_A(t) = E_I(t) - E_R(t) - E_T(t) \qquad (4)$$

实验构件的能量吸收率:

$$\eta(t) = \frac{E_A(t)}{E_I(t)} \times 100\% \qquad (5)$$

冲击点位移:

$$u(t) = c_0\int_0^t[\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t)]\,dt \qquad (6)$$

冲击点速度:

$$V(t) = \frac{du(t)}{dt} = c_0[\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t)] \qquad (7)$$

冲击载荷:

$$F(t) = SE[\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t)] \qquad (8)$$

式中　ρ、E、S、$c_0 = \sqrt{E/\rho}$ 分别代表输入杆(与输出杆相同)的密度、弹性模量、横截面积和杆中的弹性波速. 测出 $\varepsilon_I(t)$、$\varepsilon_R(t)$、$\varepsilon_T(t)$, 即可通过以上公式得到相应信息.

2　实验结果分析

图 2 和图 3 为一典型冲击过程的实验结果.

分析图 2、图 3 可知, 整个冲击过程明显分 5 个阶段:

1) 初始加载阶段($0 < t < t_1$)

冲击速度曲线斜率不断增大, 输入杆迅速撞击构件, 冲击力迅速增至峰值.

2) 初始卸载阶段($t_1 < t < t_2$)

冲击速度缓慢增加, 冲击力迅速减小. 这主要由于构件受冲击区发生破坏, 抗冲击能力降低所致.

3) 常速度阶段($t_2 < t < t_3$)

输入杆右端面速度与构件受冲击点速度相等, 保持不变, 冲击力很小(几乎为零).

4) 减速阶段($t_3 < t < t_4$)

冲击速度迅速降低, 输入杆与构件开始分离, 由于构件破坏区与输入杆间的摩擦作用, 产生了很小的拉伸力(注意: 力的方向发生了变化).

5) 振动阶段($t_4 < t < t_5$)

构件自由振动, 并在一段时间后, 即静止.

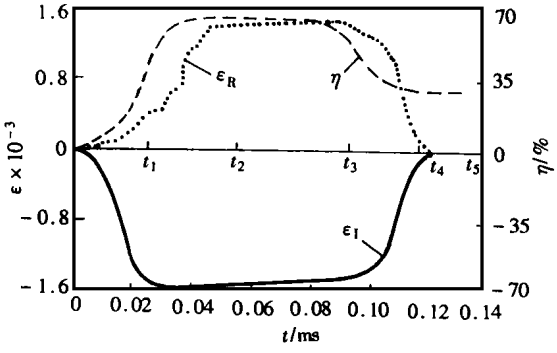


图 2　冲击力与速度

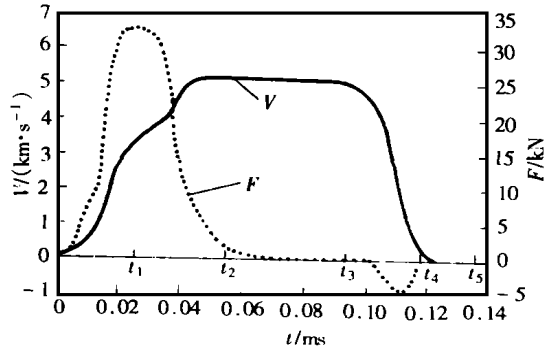


图 3　应变及能量吸收率

由图 3 能量吸收率曲线可知: 能量吸收率在前两个阶段迅速增大, 第 3 阶段增长缓慢, 在第 4 阶段由于输入杆与构件开始分离, 一部分能量反射回输入杆, 使得构件的能量吸收率降低, 最后阶段, 能量吸收率保持常值, 该值即为造成构件破坏时的能量吸收率.

表 1 为实验结果.

表 **1**　实验结果

头盔外壳材料(典型件)	泡沫衬垫密度 ρ/(kg·m^{-3})	能量吸收率 η/% 无海绵	能量吸收率 η/% 有海绵	冲击力 F/kN 无海绵	冲击力 F/kN 有海绵
环氧玻璃钢	40~60	34.3	36.5	32.6	29.8
	60~80	28.4	29.2		
	80~100	22.8	23.1		
聚酯玻璃钢	40~60	31.4	32.6	29.6	26.8
	60~80	27.6	28.1		
	80~100	22.1	22.8		
聚酯芳纶	40~60	28.6	30.1	25.4	23.6
	60~80	24.1	24.6		
	80~100	20.3	21.4		

实验中观察到: 当撞击杆速度较低时, 头盔典型件的破坏区域较大, 除了受冲击区域外壳被穿透外, 穿孔周围还出现辐射状经向裂纹, 且泡沫衬垫明显被压缩, 而撞击杆速较高时, 仅受冲击区域外壳被穿透, 并未观察到经向裂纹, 泡沫衬垫亦无明显变形. 这表明: 撞击杆速度较低时, 头盔典型件吸收能量充分, 发生整体破坏; 速度较高时, 其吸收能量效果降低, 发生局部穿透.

根据实验测量结果, 得到撞击杆速与头盔典型件能量吸收率关系曲线如图 4 所示. 该图表明: 随撞击杆速增大, 头盔典型件能量吸收率减小.

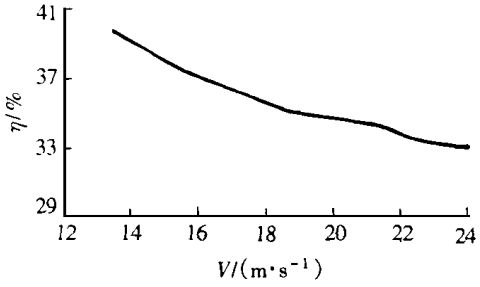


图 4 撞击杆速与能量吸收率

综合实验现象与测量结果表明: 随着撞击杆速度增大, 头盔典型件破坏形式由整体破坏转变为局部穿透, 其能量吸收率逐渐减小.

3 结 论

1) 内衬同一种泡沫衬垫的典型件, 在冲击载荷作用下的能量吸收率, 环氧玻璃钢外壳最高, 聚酯玻璃钢外壳次之, 聚酯芳纶外壳最低.

2) 减小泡沫衬垫的密度, 能明显提高典型件的能量吸收率.

3) 引入海绵, 使得构件与颅骨接触面积增大, 冲击能量扩散充分, 改善了构件的能量吸收率. 此外, 海绵的另一个重要作用在于增大了头盔外壳与颅骨间的距离, 延缓了冲击作用时间, 使得冲击力幅值降低, 这对于防止颅骨基部断裂损伤具有重要意义.

4) 随撞击杆速度增大, 头盔典型件破坏形式由整体破坏转变为局部穿透, 能量吸收率减小.

以上, 我们用 Hopkinson 压杆装置仔细研究了航空头盔典型件的整个冲击过程, 经分析冲击过程, 并与相关实验比较[1], 可知所得结果是合理的. 这表明该实验方法是可行的, 且由于它具有其它方法无法比拟的优点, 决定了它有较好的发展前景.

致谢 本实验是在中科院力学研究所冲击实验室完成的, 该实验室的王春奎副研究员、段祝平研究员、黄晨光博士提供了很多帮助, 在此表示衷心感谢.

参 考 文 献

1 SPH-4 aircrew helmet impact protection inprovement 1970~1990 final report. AD-A233784, 1984

2 Shanahan D F. Injury in U S Army helicopter crashes fiscal years October 1979~September 1985. Journal of Trauma, 1989, 29(4): 415~423

3 马晓青. 冲击动力学. 北京: 北京理工大学出版社, 1992

4 Slobodnik B A. SPH-4 helmet damage and head injury correlation. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1979, 50(2): 139~146

5 赵西寰. SHPB 技术的进展. 太原工学院学报, 1981, (3): 102~113

Experimental Studies of Impact Protection Performance of Aircrew Helmet Typical Component

Chen Zuorong Yang Yiqian Ma Hezhong

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, , Dept. of Flight Vihicle Design and Applied Mechanics)

Abstract The impact protections provided by several aircrew helmet components are investigated in using the SHPB apparatus. The energy absorption rates of these components are examined. The impact process and energy absorption process are discussed. Further, the way in which the material mechanical properties of helmet shell and the density of helmet foam liner affecting the energy absorption capacity of helmet is analyzed, showing that the mechanical properties of shell and the density of foam liner play an important role in the energy absorption process to a certain extent. The experimental method used by this paper is original. This work provides reliable experimental basis for designing a new generation aircrew helmet.

Key words shocks(mechanics); Hopkinson bars; skull; aircrew helmet; energy absorption rate