

飞机油箱水锤效应研究方法及影响因素

李咪咪,王永超,杨殿国,陈耀欢

(中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院,西安 710089)

摘要: 油箱是飞机生存力研究中的关键部件,水锤效应是油箱的主要破坏方式之一。概述了国内外在飞机油箱水锤效应研究中取得的一些进展,包括水锤效应数值模拟方法、试验方法,水锤效应的影响因素,基于水锤效应影响的油箱结构设计等。综合国内外理论研究、仿真分析和试验结果,得出弹片材料、弹片速度、箱体空气比例等都是水锤效应的影响因素。研究成果可为进一步开展水锤效应研究提供参考。

关键词: 水锤效应;充液箱体;易损性;子弹冲击

中图分类号: V228.1⁺¹

文献标识码: A

Research Methods and Factors of Hydrodynamic Ram Effect for Aircraft Fuel Tank

Li Mimi, Wang Yongchao, Yang Dianguo, Chen Yaohuan

(The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Fuel tank is the key component in the study of aircraft survivability. Hydrodynamic ram effect is one of the main failure ways. Numerical simulation methods, test methods, impact factor and fuel tank structure design are the main research content for analyzing the effect of hydrodynamic ram on aircraft fuel tank. The development of latest research methods and achievements show that the materials of projectile, velocity and air proportions are the influence factors of hydrodynamic ram. The results of the research provide a reference for the deeply researching of hydrodynamic ram.

Key words: hydrodynamic ram effect; liquid-filled tank; vulnerability; projectile impact

0 引言

战斗机在执行作战任务时,容易遭受地面高射武器、导弹等的攻击,机翼在装有燃油的情况下,受到高速弹丸或破片攻击后,油箱被击穿,在水锤效应作用下可能对机翼结构造成重大损伤,从而导致灾难性事故的发生。早在20世纪70年代,国外就开始了关于水锤效应的相关研究工作,做了大量试验和分析,并针对弹片或其他高速物体击穿飞机油箱而引起的水锤效应进行了专题研究^[1-6]。

高速破片对机翼油箱的毁伤以及相应试验方

法研究,对面向水锤效应的机翼油箱结构优化设计具有重要意义。因此,在飞机结构设计方案阶段以及详细设计阶段,应考虑油箱水锤效应的影响,提出良好的解决措施,以提高飞机战场生存力或是将水锤效应的影响和损坏降至最低。

本文从水锤效应的四个阶段简述其产生的机理及其作用下油箱的破坏形式,并通过数值模拟和试验两种手段介绍水锤效应的研究方法和思路。基于水锤效应的影响,介绍F-22飞机翼盒抗损伤设计要求,以及国外研究者提出的新结构形式。

1 水锤效应与危害

高速弹片射穿装有燃油的油箱时,会在燃油中引起强烈的压力脉冲,这种压力波作用于油箱壁可能导致油箱全面破坏,这种现象称为水锤效应。水

锤效应的产生包含四个阶段^[1]:第一阶段,入射阶段(shock phase),当高速体刚射穿充满液体的容器结构时,冲击能量传递给液体,产生弧形的压力震荡波,可能最先导致冲击位置附近结构的破坏;第二阶段,高速体受阻减速阶段(drag phase),当高速体穿过液体时,将其自身的动能转换成液体的运动,同时高速体在液体阻力的作用下减速,液体沿着高速体射击路径往外移动形成一个辐射状的压力区域,在此阶段液体逐渐被加速,因此不会形成急剧的压力峰值;第三阶段,空腔形成阶段(cavitation phase),由于在上个阶段中液体沿射击路径往外扩展,形成了液体空腔,空腔会随着高速体的移动,慢慢膨胀然后坍塌,空腔开始坍塌时会产生巨大的压力峰值;第四阶段,射出阶段(exit phase),高速体射出时将穿过先前由震荡阶段和后续液体载荷形成的压力墙。水锤效应过程如图 1 所示。

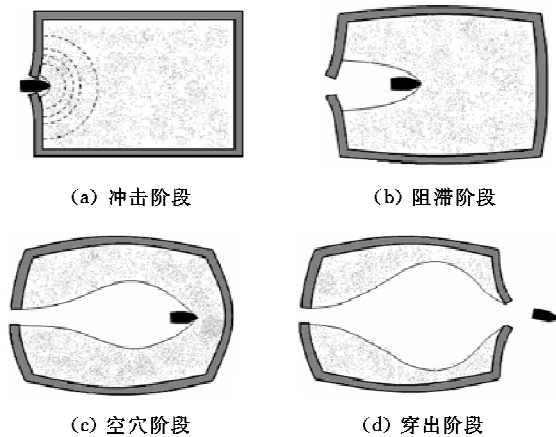
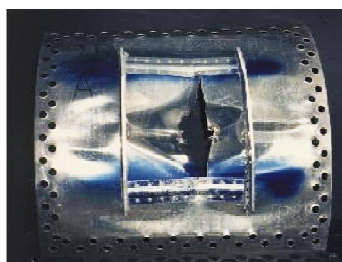
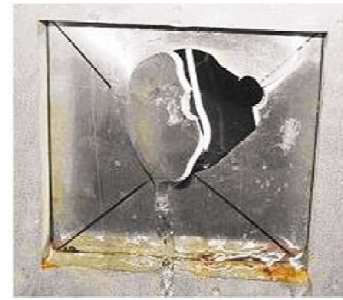


图 1 水锤效应产生的四个阶段
Fig. 1 Four phases of hydrodynamic ram

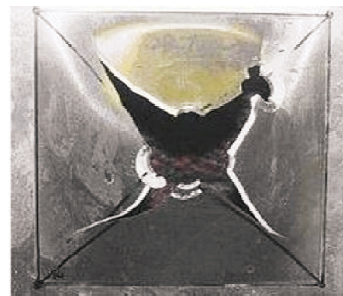
在众多的飞机易损部件和结构中,机翼暴露于火力威胁的面积最大,因此机翼油箱很容易遭到炮弹的威胁。水锤效应产生的水锤压力会撕裂油箱壁结构,其直接的破坏形式如图 2 所示。



(a) 缝状撕裂



(b) 穿孔破坏



(c) 花瓣状撕裂

图 2 油箱壁在水锤效应下的破坏形式
Fig. 2 Destory mode of fuel tank wall under the influence of hydrodynamic ram

当有高速体或炮弹击穿机翼油箱时,油箱中的燃油在水锤效应的作用下将机翼蒙皮从翼梁上下缘条处撕裂,造成机翼壁板分离,同时破坏机翼梁腹板和翼肋。具体破坏形式如图 3 所示。



图 3 机翼翼盒在水锤效应作用下的破坏形式
Fig. 3 Destory mode of wing tank under the influence of hydrodynamic ram

2 水锤效应研究方法

2.1 水锤效应的数值模拟方法

国外通常采用大型非线性动力学有限元分析软件 LS-DYNA 进行水锤效应的数值模拟,R. L.

Hinrichsen 等^[2]分三步模拟水锤效应的过程：第一步是模拟子弹与箱体的接触，分别对子弹在不同位置 and 不同角度撞击翼盒造成的损伤进行了模拟；第二步是模拟子弹穿透箱体的水锤效应；最后模拟弹丸爆炸后的综合作用。研究中还采用 LS-DYNA 软件中的 INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 功能实现多材料欧拉网格的建模问题。

Charles E. Anderson Jr 等^[3]采用欧拉 CTH 代码模拟了 Lundstrom 采用 23 mm 高爆弹穿透水箱的试验，模拟形成的空腔大小与试验一致，且模拟中四个位置处的液体压力有两处与试验一致，另两处比试验值低 20%。S. C. McCallum 等^[4]、R. A. Gingold 等^[5]和 Matej Vesenjok 等^[6]采用 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 和 CEL (Coupled Euler Lagrange) 等几种技术模拟水锤效应，通过自适应接触算法模拟子弹与壁板的接触问题，通过全耦合算法模拟子弹和液体、箱体和液体的流固耦合效应。通过穿甲和流固耦合的综合分析，模拟子弹穿透油箱的过程。通过试验数据对 ALE 和 SPH 方法加以验证，如图 4 所示。

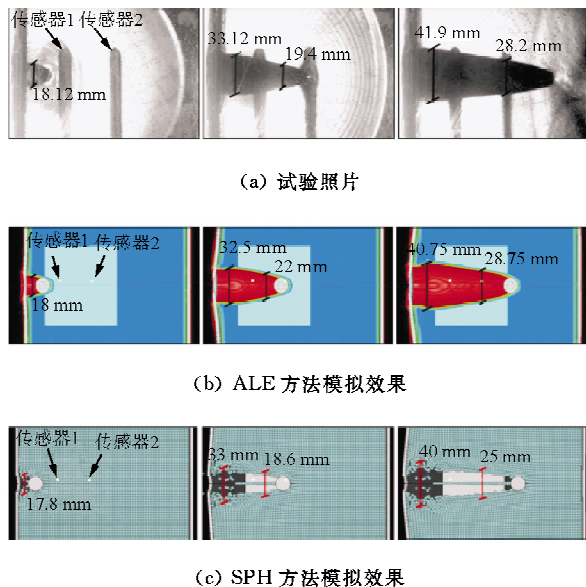


图 4 水锤效应试验与数值模拟

Fig. 4 Test and numerical simulation of hydrodynamic ram

国内，李亚智等^[7]采用 MSC. Dytran 动力学有限元分析软件进行机翼油箱水锤效应的模拟，在水锤效应数值模拟中，用欧拉单元模拟水和空气，

用拉格朗日单元模拟子弹和箱体；考虑箱体和子弹的弹塑性变形、应变率效应和几何非线性变形，求解得到子弹击穿过程中箱体的动态应力、应变的时间历程。

综上所述，高速弹片在穿透载液箱体时产生的破坏远远大于其对一个空的油箱的破坏。分析表明，对空油箱形成的破损一般略大于弹片直径，而由液体冲击造成的损伤可能会使连接破坏甚至失效。仅有国外的少量文献提到采用含能炮弹进行水锤效应的模拟^[2-3]，原因是分析爆炸冲击和高速弹片动能共同作用下的影响较为困难，目前这还仅是一个研究方向。在所有研究中，量化的数据主要是液体压力及箱体壁的应变，这也是研究者关注的重点。

2.2 水锤效应试验方法

综合分析国内外对水锤效应的试验研究^[8-12]，发现研究者用到的水锤效应试验装置基本类似，主要包括子弹发射装置、充液箱体、箱体支架及防护装置、高速摄像头、测速仪、高速压力传感器和应变片等。具体安装如图 5 所示。

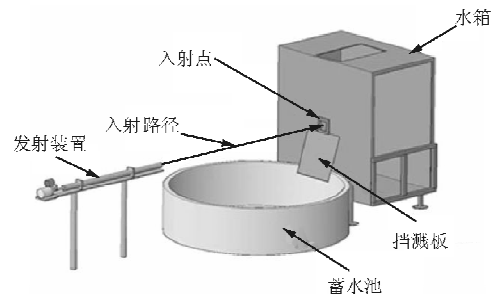
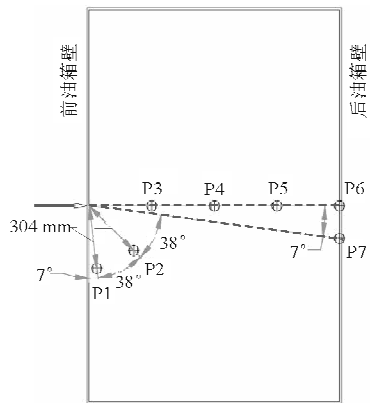


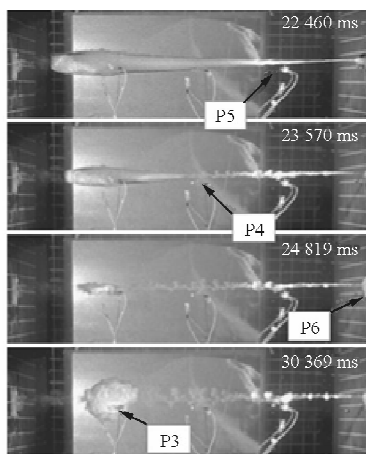
图 5 试验设备安装

Fig. 5 Installation of the test devices

通过箱体内部的各个高速压力传感器(如图 6(a)所示)可以测出各位置压强随时间或是射击路程的变化情况；通过箱体上的应变片可以测量箱体的变形值。通过高速摄像机观察液体内部形体的变化情况(如图 6(b)所示)，重点关注沿射击路径上液体的空腔形成与坍塌的特点，形成可视化结果。将试验数据与数值模拟结果进行对比分析，在修正数值模拟结果的基础上，改进水锤效应动力学有限元模型，形成一套可以评估机翼油箱水锤效应的工程方法。



(a) 油箱内部高速压力传感器分布位置



(b) 充液油箱内部水锤效应的变化情况

图6 压力传感器布置及测量

Fig. 6 Distribution and measurement of pressure sensor

通过试验验证了高速弹片入射载液箱体时形成入射波、弹片受阻减速及液体中空腔形成等过程。最主要的参数是动能,它取决于弹片材料与速度。试验中常用的弹片材料为铝合金、钢和钨合金。弹片速度分布很广,文献中涉及最小的试验速度为 $240\sim 450\text{ m/s}$ ^[8,10];普遍应用的弹片速度为 $600\sim 900\text{ m/s}$ ^[1,3],这是轻式武器所能达到的射击速度;更高的达到 $2\,000\text{ m/s}$ ^[4,11],这需要专业的弹道发射装置才能实现。试验中采集到的入射压力波频宽平均为 $0.85\ \mu\text{m}$ ^[6],因此要选适用的高频响应传感器来记录压力变化。载液箱体采用一面或多面为透光材质的设计,以保证光源和摄像。

国内关于水锤效应试验的文献未见报道,与此相关的有炮弹对飞机、火箭等杀伤力的试验,关注的重点是炮弹的性能及能否对油箱引燃、引爆等。试验装置相对比较简陋,一般采用柴油桶代替飞机油箱结构,并没有安装压力、应变采集设备。

3 水锤效应的影响因素

国内外针对水锤效应进行了多项研究,发现以下三个因素对水锤效应产生的动态响应至关重要。

3.1 弹片材料

弹片材料一般分为钨合金、钢、铝合金三类,入射阶段速度相同的弹片撞击箱体壁的瞬间产生的冲击波幅值基本一致。钨合金对箱体内液体造成的扰动最大,分别在弹片受阻减速阶段、空腔坍塌阶段,以及在射出壁板附近都检测到较高的压力值;铝合金弹片试验并没有检测到明显的数值;钢弹片产生的压力值则在前两者之间,如图7所示^[8]。

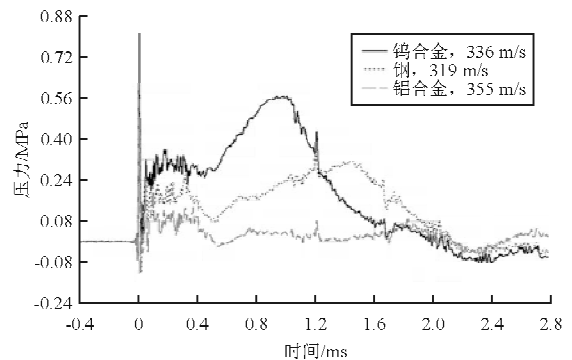
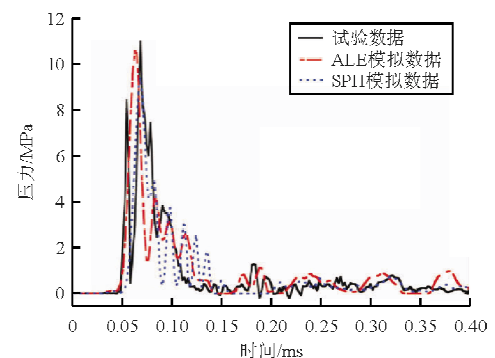


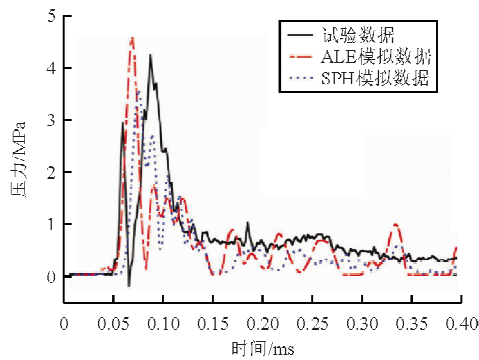
图7 不同弹片材料在受阻减速阶段的液体压力值对比

Fig. 7 Pressure comparison of different material on deceleration phase

3.2 射弹速度

在油箱100%装满水(试验中用水代替燃油)的情况下,通过试验和数值模拟两种方法共同验证弹片分别在 600 和 900 m/s 的速度下穿透油箱后产生的压力效应^[1]。两种不同速度下同一位置的油箱压力曲线如图8所示,速度越大,产生的压力越大。

(a) 弹片速度为 900 m/s



(b) 弹片速度为 600 m/s

图 8 不同速度下的油箱压力曲线

Fig. 8 Tank pressure curve comparison on different speed

3.3 箱体液体与空气比例

当弹片撞击装有燃油的油箱时产生的损伤要比穿透空油箱时大。对油箱中三种不同空气比例(1%、5%、10%)用 LS-DYNA 进行水锤效应模拟发现,空气比例越小,油箱冲击波压力越大,油箱壁损坏越严重。相反,随着空气比例增加,液体的可压缩性提高,可以有效减小震荡波的强度从而减小对箱体结构的破坏力^[4]。油箱压力与含空气比例的关系如图 9 所示。

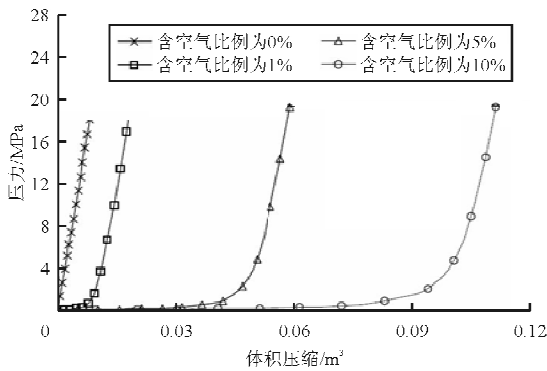


图 9 水锤效应产生的压力与含空气比例的关系

Fig. 9 Relationship between the pressure and air ratio volume under the influence of hydrodynamic ram

4 基于水锤效应影响的油箱结构设计

基于水锤效应的影响,对飞机油箱壁及周边梁、肋结构的冲击压力瞬间可达 10 000 psi^[13-14],传统的翼盒结构设计未考虑承受大量级的瞬间冲击载荷的影响,造成梁与蒙皮的连接处失效,蒙皮掀开撕裂,梁腹板屈曲等。G. Czarneck 等^[13]通过对

10 多种翼梁与壁板连接接头形式的高压冲击试验分析,发现接头设计形式在静载荷和动载荷下的承载能力不存在明确的关联性。从承受静载/动载性能、重量等多个因素考虑,复合材料翼盒结构中,翼梁与蒙皮通过编织与胶接的共固化结构比普通胶接、螺栓连接要好。

在 DFC 项目(Decoupled Fuel Cells Program)中,F-22 翼盒在水锤效应下,损伤破坏控制目标被定为 5 个梁间隔^[14]。若以传统的设计方法采用全复合材料机翼结构,则无法抵抗水锤效应的强大破坏力;而如果 19 个翼梁全部采用钛合金,重量上增加太多。综合考虑以上两个因素,最终每间隔两个翼梁采用一个钛合金翼梁,钛合金的翼梁、翼肋可以形成一个保护外壳,有效地防御水锤效应带来的破坏。F-22 飞机机翼结构如图 10 所示。

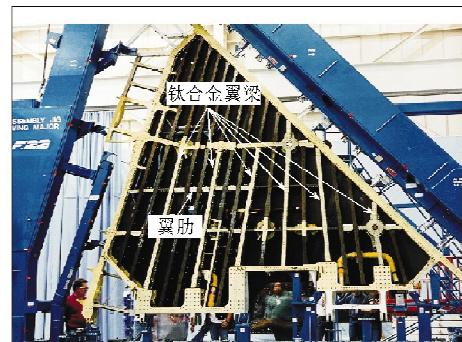


图 10 F-22 机翼结构

Fig. 10 Wing structure of F-22

Childress Jamie^[14]基于水锤效应的影响提出了一种新设计思路,即蜂窝式翼盒结构(Cellular Wing Box),如图 11 所示。

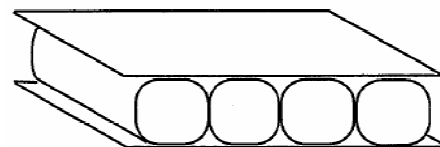


图 11 蜂窝式翼盒结构

Fig. 11 Cellular wing box structure

以 F-22 飞机翼盒为原型,进行了四种方案的对比。复合材料蜂窝式翼盒结构比传统全复合材料结构轻 2%,比钛合金翼梁和复合材料翼梁混合布置的结构轻 15%;而且在直径为 30 mm 的杀伤燃烧弹以 2 200 ft/s 速度冲击下,造成的损伤为 3

个梁间隔,满足 F-22 项目水锤效应损伤控制在 5 个梁间隔的要求。

5 结束语

飞机油箱水锤效应研究是一项系统的工作,包含水锤效应机理研究、数值模拟分析方法研究、油箱水锤效应试验研究及基于水锤效应影响的结构设计技术研究等。水锤效应的产生主要取决于炮弹的动能、油箱含油比例,动能越大、含油量越多,冲击压力越大,造成的结构损伤越大。合理的设计方法(如连接处采用共固化设计并加强、采用钛合金或蜂窝式复合材料结构把翼盒分隔成多个单独的承压结构)可以有效地减小水锤效应的损伤范围。

国内关于飞机油箱水锤效应的研究应结合国外现有试验数据、技术资料及研究分析方法,深入研究机翼油箱水锤效应涉及到的流固耦合、接触碰撞、材料和几何非线性等力学问题,运用动力学有限元工具或构建经验公式对水锤效应进行撞击穿透数值模拟,同时开展试验验证评估。在此基础上,开展飞机油箱结构优化设计和降低水锤效应对结构破坏力的措施研究,为提高飞机战场生存能力提供技术支撑。

参考文献

- [1] Varas D, Zaera R, López-Puente J. Numerical modeling of the hydrodynamic ram phenomenon[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(3): 363-374.
- [2] Hinrichsen R L, Kurtz A G, Wang J T, et al. Modeling projectile damage in transport aircraft wing structures[J]. *AIAA Journal*, 2008, 46(2): 328-335.
- [3] Charles E Anderson Jr, Sharron T R, James D Walker, et al. Simulation and analysis of a 23 mm HEI projectile hydrodynamic ram experiment[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(9/10): 981-997.
- [4] McCallum S C, Townsend D D. Simulation of hydrodynamic ram and liquid aeration[C]. 5th European LS-DYNA Users Conference, 2005.
- [5] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics-theory and application to non-spherical stars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1977, 181: 375-389.
- [6] Matej Vesjenjak, Zoran Ren. Application of smoothed particle hydrodynamics method in engineering problems[J]. *Computational Methods in Applied Sciences*, 2009, 11: 273-290.
- [7] 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)
- [8] Peter J Disimile, Luke A Swanson, Norman Toy. The hydrodynamic ram pressure generated by spherical projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 821-829.
- [9] Sparks C, Hinrichsen R, Friedmann D. Comparison and validation of smooth particle hydrodynamics (SPH) and coupled euler lagrange (CEL) techniques for modeling hydrodynamic ram [C]. USA: 46th AIAA/ASME/ASCE/AIIS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2005.
- [10] Peter J Disimile, John M Davis, John M Pyles. Qualitative assessment of a transient spray caused by a hydrodynamic ram event[J]. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2007, 14(3): 287-303.
- [11] 曹兵. 不同破片对模拟巡航导弹油箱毁伤实验研究[J]. *火工品*, 2008(5): 10-13.
Cao Bing. Experimental investigation on damage to simulative fuel tank of cruise missile by different fragments[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008(5): 10-13. (in Chinese).
- [12] Mario Gonzalez, Chad Sparks, Christopher Kubes, et al. Comparison of the tumbling behavior and pressure evolution of several API projectiles in a hydrodynamic ram environment[C]. 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2008.
- [13] Czarneck G, Maxson M, Sawdy J, et al. Evaluation of skin-spar joint resistance to hydrodynamic RAM[R]. OL-AC-DPR-07-08, 2007.
- [14] Childress Jamie. Development of survivable co-cured wing structures[C]. Anaheim: AIAA and SAE, 1998 World Aviation Conference, 1998.

作者简介:

李咪咪(1982—),女,工程师。主要研究方向:机翼结构设计。

王永超(1981—),男,工程师。主要研究方向:机身结构设计。

杨殿国(1985—),男,助理工程师。主要研究方向:机翼结构设计。

陈耀欢(1985—),男,助理工程师。主要研究方向:机翼结构设计。

(编辑:马文静)