

文章编号:1674-8190(2014)01-001-06

# 飞机油箱水锤效应研究方法及进展

刘国繁<sup>1</sup>, 陈照峰<sup>1</sup>, 王永健<sup>2</sup>, 刘伟兰<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016)

(2. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190)

**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。综述了国内外在水锤效应研究方面的三种不同方法, 发现试验方法简单直接, 却易受试验条件限制; 理论分析方法由于引入过多的假设, 适用范围有限; 数值模拟方法操作简单, 参数可控, 但其准确性受材料本构参数的影响。单一地使用一种方法不能解决飞机油箱的水锤效应问题。本文在总结前人研究水锤效应的基础上, 指出只有结合使用三种方法才能真正解决水锤效应问题, 从而设计高生存力的油箱。

**关键词:** 水锤效应; 充液油箱; 有限元; 数值模拟; 生存力

**中图分类号:** V228.1<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

## Research Methods and Progress of the Hydrodynamic Ram Effect of Aircraft Fuel Tanks

Liu Guofan<sup>1</sup>, Chen Zhaofeng<sup>1</sup>, Wang Yongjian<sup>2</sup>, Liu Weilan<sup>1</sup>

(1. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Fuel tank is the key component in the study of aircraft survivability. Hydrodynamic ram effect is one of the main failure ways. A comprehensive introduction is taken on the three research methods of the Hydrodynamic ram effect. It is found that the test method is simple and direct, but limited under the test conditions; the theoretical analysis method is introduced too many hypothesis and limited its scope; the digital simulation method is of simple operation and can control the parameters, but its accuracy is affected by the material constitutive parameters. Brief principle on hydrodynamic ram effect is summarized in this paper. In order to design the high viability tank, it is the only way to combine theoretical analysis with numerical simulation based on the unified test method.

**Key words:** hydrodynamic ram effect; fuel tank filled with fluid; finite element method; digital simulation; survivability

## 0 引言

近年来, 提高飞机生存力的研究备受重视, 美

国军方把生存力作为飞机设计中主要考虑的因素之一。飞机生存力分析中最重要的一个方面是燃油系统, 特别是油箱, 主要原因是油箱占据了整个飞机体积的一大部分, 更容易受到攻击。燃油系统的破坏基本上分为燃烧、爆炸、水锤效应三类。水锤效应破坏油箱, 引起燃油泄漏、燃烧进而爆炸, 对飞机产生灾难性破坏。在越南战争中, 很多低空飞行的飞机被小火力武器所击落; 在最近的“沙漠风暴”军事行动中, 75%的飞机失事是由于燃油系统

收稿日期: 2013-11-19; 修回日期: 2013-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61303157)

中国博士后科学基金(2135M541044)

通信作者: 刘国繁, bmlgf123@163.com

被破坏引起的<sup>[1]</sup>。因此,研究水锤效应对油箱的影响非常重要。

在实际作战环境中,高速子弹击穿油箱,将自身动能通过燃油传递给油箱壁板,导致油箱整体破坏,这种现象称为水锤效应。击穿过程如图1所示。

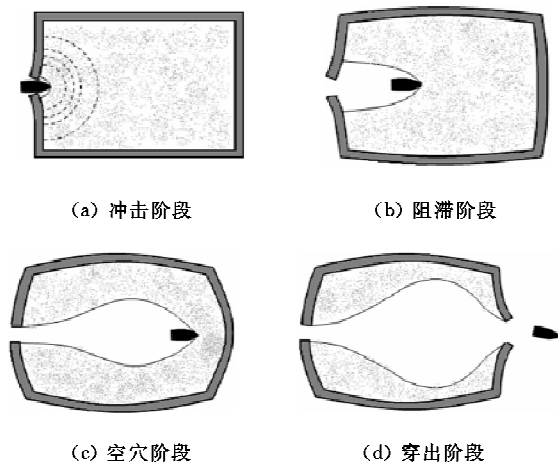


图1 水锤效应过程

Fig. 1 Process of hydrodynamic ram effect

关于水锤效应的研究工作进展缓慢,主要原因是其涉及内容广泛,影响因素较多,难以确定统一的试验方法,且现有资料较少,只能根据有限的资料了解该问题的相关情况。

本文对近年来关于水锤效应的研究进行归纳总结,综述了水锤效应的试验研究、理论分析和数值模拟三种研究方法,从中提炼出进行水锤效应研究的经验准则,为今后工作提供参考依据。

## 1 水锤效应的试验研究

试验方法作为研究水锤效应的最直接的手段,可直接获取各项试验数据,数据可信度高。1974年,R. E. Ball等<sup>[2-3]</sup>测量了不同能量等级的子弹穿透油箱过程中的流体压力和入射板应变,试验证明:子弹形状对推导得到的子弹濒临穿出速度的影响不大;穿透过程中能量衰减取决于入射角度和子弹质量,垂直入射时,能量衰减最小,质量大的子弹能量衰减多;子弹形状和动量对冲击波的运动影响不大;同时,引入阻滞系数分析弹速衰减,试验验证了其可用性。

1975年,John W. Patterson<sup>[4]</sup>指出水锤效应的破坏程度取决于防空武器和油箱的物理特性,并将水锤效应分为五个阶段:入射阶段、冲击阶段、阻滞阶段、空穴阶段和穿出阶段。同年,John W. Patterson<sup>[4]</sup>进行了水锤效应的流体压力测量试验,试图测得冲击阶段流体压力,但是由于压力传感器的分辨力无法测定如此短暂的高压冲击波而失败,只能根据子弹的冲击参数计算得到。阻滞阶段压力扰动以流体声速传入流体,能量传播缓慢,压力峰值低,便于测得,试验发现入射板的反射作用对油箱内部流体压力的影响极为重要。弹速数据表明阻滞系数随子弹的速度、形状和翻滚行为而变化,是一个变量,常数阻滞系数会导致压力波形扭曲。空穴在阻滞阶段产生,子弹传入流体的动能使水锤长大,其中充斥着子弹表面蒸发的蒸汽和从击穿孔进入的气体,空穴长大直到被壁板反射波阻止,进入坍塌阶段,在坍塌过程中,空穴气体被压缩导致空穴膨胀,如此反复直到所有的能量被流体吸收,此阶段结束,压力震荡导致壁板破坏。

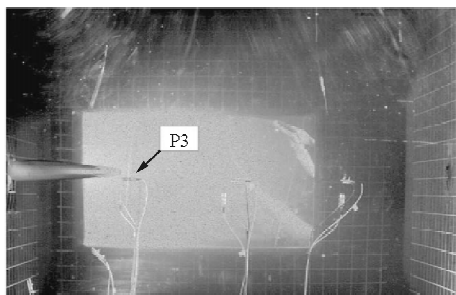
20世纪70年代,代顿大学研究所的S. J. Bless等<sup>[5]</sup>测试了速度范围为1.5~2.1 km/s,直径为11.1和14.3 mm的子弹穿透油箱的过程,得到了入射板、侧板的变形情况,流体压力以及子弹轨迹图,表明2024-T3铝合金比7075-T6铝合金更能承受因水锤效应引起的破坏。

1988年,E. A. Lundstrom<sup>[6]</sup>对水锤效应进行了理论分析,并测得不同速度、不同入射角度的子弹穿透油箱时的压力和壁板应变数据,证实了其理论分析的可用性。1989年,E. A. Lundstrom等<sup>[7]</sup>进行了23和30 mm的高爆燃烧弹穿透钢制水箱的试验,获定了4个位置的流体压力时程。C. E. Sparks等<sup>[8]</sup>进行了12.7 mm子弹穿透油箱的试验,测定了数点流体压力,并用高速摄影机记录下了子弹的轨迹。

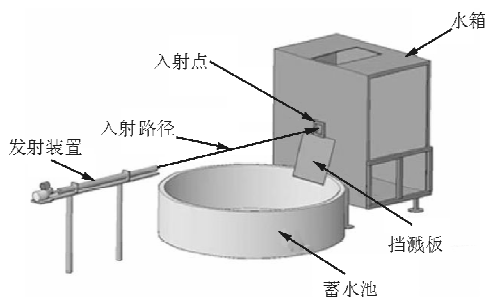
美国航天研究和咨询小组的J. G. Avery<sup>[9]</sup>进行了子弹撞击铝合金油箱和碳纤维增强树脂基复合板油箱的试验,分析弹片形状、油箱结构和材料对水锤效应的影响。指出弹片形状对油箱的结构响应具有潜在的影响;油箱壁板上的加固件提供了一个横向约束阻止了壁板分层破坏,减

小了水锤效应的破坏程度;对于碳纤维增强树脂基复合材料油箱,出口板的破坏集中在弹片穿孔附近,而进口板的破坏集中在板连接处和弹片穿孔处。M. Nishida 等<sup>[10]</sup>进行了速度 40~200 m/s 的球弹撞击铝合金薄壁方管的试验,证明方管中的水降低了壁板的强度,壁板裂纹扩展方式和子弹的弹道极限速度取决于壁板材料的最大强度和子弹直径。

2008 年, Peter J. Disimile 等<sup>[11]</sup>为了研究水锤效应的压力传播方式,进而确定油箱的破坏机理,分别进行了直径为 12.7 mm 的钨合金、钢和铝合金球弹撞击油箱的试验,测试油箱尺寸为 0.864 m × 0.508 m × 1.829 m,避免壁板反射产生的压力波聚集,试验测得了不同位置的的压力时程图和水锤变化图。试验结果和装置如图 2 所示。



(a) 水锤的产生



(b) 试验装置

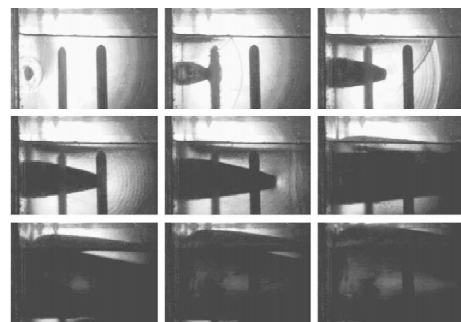
图 2 试验结果和装置

Fig. 2 Result and device of the test

结果表明:水锤是能量传播的结果,子弹动能转化为流体动能,在油箱内产生高压波动,足以破坏油箱;冲击阶段产生短暂的高压冲击波,一般小于 5 $\mu$ s;随后进入阻滞阶段,流体压力从零开始逐渐增加,增加的幅度取决于子弹的动能,子弹一旦穿出,流体压力便开始下降,直到环境压力以下,空

穴开始坍塌,压力又开始上升;空穴坍塌阶段,沿子弹轨迹方向的不同位置产生众多压力波动,在坍塌的最后时刻达到峰值,在某些钨合金球弹的试验中,压力峰值高达 31 MPa。

2008 年, D. Varas 等<sup>[11]</sup>用直径 12.5 mm 的钢制球弹分别以 600 和 900 m/s 的速度击穿 6063-T5 铝管,铝管分别含有 60% 和 75% 的水,研究空气层对水锤效应的影响,试验结果如图 3 所示。子弹动能通过流体传播给壁板,使壁板产生显著变形,冲击阶段,高密度压力波到达铝管壁产生最初的变形;阻滞、空穴和穿出阶段产生的压力脉冲迫使流体加速导致壁板产生后续的非弹性变形;弹速和测量点决定压力脉冲强度,在靠近撞击点的位置,流体体积分数的影响比较重要,而远离撞击点的位置,影响不大;阻滞和空穴阶段,子弹传播给流体的法向动量是壁板变形的主要因素,高速下,空穴的生长率高,动量的影响更显著;内部流体通过空气区域平行壁板扩张,因此高速子弹撞击含低体积分数的铝管将在靠近子弹轨迹的局部区域产生永久变形。



(a) 水锤的产生过程



(b) 空箱和充液油箱壁板变形情况对比

图 3 试验结果

Fig. 3 The result of test

2011年, D. Varas 等<sup>[12]</sup>用相同尺寸的碳纤维增强复合材料方管代替铝管, 测得了不同位置的的压力和各个壁板的应变情况。表明流体压力是弹速和测量位置的函数, 压力峰值主要取决于弹速, 速度为 900 m/s 的子弹产生的压力峰值是 600 m/s 子弹的两倍。进出口板的应变取决于油箱内流体的体积分数, 流体体积分数越高, 即便子弹的速度低, 应变也越大; 底板的应变取决于弹速, 弹速越高应变越大, 顶板未发现明显规律。对于油箱的失效方式, 低速条件下, 壁板失效主要集中在进出口板和底板, 顶板并没有变形, 流体迫使壁板变形产生裂纹, 水的体积分数越大, 裂纹越长, 所以低速条件下含高体积分数水的油箱更危险。高速时, 对于未装满水的油箱, 顶板也产生变形, 而且进出口板变形更大, 但是装满水的油箱顶板却没有变形, 所以高速条件下, 含低体积分数水的油箱更危险。

试验方法这一复杂的过程受试验条件和测试技术的限制, 测试过程复杂, 因此理论推导和数值模拟便成为了研究该问题的重要方法。

## 2 水锤效应的理论分析

理论分析方法以物理学理论为基础, 从理论的角度分析水锤效应, 便于理解水锤效应产生的科学缘由。R. E. Ball 等<sup>[2-3]</sup>对水锤效应进行了初步的理论分析: (1) 使用泊松理论预测水锤压力载荷下的结构响应, 假设从油箱壁板反射的压力波是一维的, 即垂直壁表面向外传播; (2) 确定了水锤效应冲击阶段入射板的结构响应模型; (3) 用 SATANS 把 Yurkovitch 导出的流体压力简化为离入射点的距离  $r$  和时间  $t$  的函数; (4) 通过一维弹性波传播理论修改 SATANS, 用来分析入口壁板的结构响应; (5) 基于流固耦合的一维弹性波传播理论改进了 B-R1 程序, 称为 B-R1HR, 使之包含流固耦合, 能够分析油箱壁板响应; (6) 理论推导了空穴半径与流体压力的微分方程, 得到了空穴坍塌的特征时间, 并把其 60% 作为实际空穴坍塌时间。

Z. Rosenberg 等<sup>[13]</sup>建立了水锤效应引起金属薄板毁灭性破坏的定性模型, 该模型基于断裂力学, 表明引起壁板灾难性失效的临界冲击速度取决于壁板的断裂韧性以及其他几何参数(子弹和钢板

尺寸)。该模型可以预测球形和立方体形子弹作用于不同断裂韧性特征铝合金壁板的临界速度。

美国海军武器中心的 E. A. Lundstrom<sup>[6]</sup>总结前人的工作, 形成了一套理论: (1) 压力波的产生理论, 该理论源于 Bristow、Lundeberg 和 Yurkovitch 的工作, 他们用油箱中一个移动的点源来描述流体的运动, 形成了压力产生理论的基础, Lundstrom 使用一个基于子弹阻力的移动线源来描述流体的运动, 并通过试验证实了这种理论。(2) 流固耦合作用, 由于泊松理论(假设从油箱壁反射的压力波是垂直壁表面向外传播)不能描述在水锤效应作用下的流固耦合作用, Lundstrom 提出了变量映像法, 把流固界面压力波分解为入射波和反射波, 入射波源于子弹或其他表面反射而成, 与壁板运动无关, 而反射波取决于入射波和壁板的运动, 假设反射波的势能由入射波的势能乘以一个未知的函数得到, 则该函数取决于界面上流体与壁板的相对速度。(3) 结构响应模型, Ankeney 提出了一个近似结构响应模型, 假设一块侧面呈余弦曲线形状的变形板, 振幅用拉格朗日运动方程计算, Lundstrom 通过求解拉格朗日运动方程扩展了这一结构响应模型, 使之不仅可以预测更大挠度、壁板变形呈现余弦曲线形状的情况, 还适用于壁板变形呈现高斯曲线变形的情况和更多的边界条件, 包括固定边界、自由边界、既非固定边界又非自由边界的情况。

1998年, M. W. Lewis 等<sup>[14]</sup>利用侵入边界法建立了水锤的数学模型, 将计算结果与赖特-帕特森空军基地的试验结果进行对比, 但由于建模过程中存在太多的简化导致模型失败。

水锤效应的理论分析进展缓慢, 主要原因是水锤效应涉及范围广泛, 包括复杂的流固耦合问题, 分析过程中引入过多假设, 其结果缺乏准确性。

## 3 水锤效应的数值模拟

数值模拟方法可以对水锤效应进行全物理全过程的计算, 获得不同时刻的物理图像和各种瞬变状态, 节省了大量成本, 为设计高生存力的油箱提供了可靠的依据。1998年, P. Santini 等<sup>[15]</sup>为研究包容性涡轮发动机失效产生的碎片撞击油箱的过

程,使用 AUTODYN-2D 模拟了三种碎片冲击油箱的过程,基于模型对称性,把三维问题简化为二维问题,大大缩短了计算时间。由于碎片形状难以确定,分别选用  $\phi 13 \text{ mm} \times 610 \text{ mm}$  的长圆柱,  $\phi 155 \text{ mm} \times 4.4 \text{ mm}$  的薄圆柱和  $\phi 54 \text{ mm}$  的球形碎片。油箱材料为 7075-T6 铝合金,尺寸为  $2\,032 \text{ mm} \times 546 \text{ mm} \times 432 \text{ mm}$ 。不同的网格模拟不同的材料,二维 Lagrange 模拟碎片,薄壳 Lagrange 网格模拟油箱壁板, Euler 网格模拟燃油。结果表明:碎片能量等级越高,产生的压力冲击波越大,碎片的穿孔越大,最终弱化油箱的结构,增加油箱失效的可能性。

1999 年, C. E. Anderson Jr<sup>[16]</sup> 用欧拉冲击波代码 CTH 模拟了 23 mm 的高爆燃烧弹撞击、穿透、爆炸破坏充液油箱的过程,得到了不同位置的应力时程图,对比 E. A. Lundstrom 等<sup>[7]</sup> 的试验结果,发现其中两个位置的应力时程具有较好的一致性,但是另外两处的计算结果明显低于试验结果。

2005 年, C. E. Sparks 等<sup>[8]</sup> 使用 SPH 算法和 CEL 算法对水锤效应进行模拟,并将计算结果与试验对比,证实了 SPH 算法和 CEL 算法在模拟流固耦合问题上的可用性。2007 年,李亚智等<sup>[17]</sup> 用 MSC. Dytran 对高速子弹垂直击穿充液油箱的动态响应过程进行了模拟,箱体为空箱和有水油箱。考虑材料在高应变率下的弹塑性动态行为和几何非线性变形,通过设定子弹和箱体、子弹和流体以及流体和箱体的接触耦合关系,将穿甲分析和流固耦合分析有机结合起来,实现了子弹穿透油箱的模拟;求解得到了子弹击穿过程中箱体壁板的动态应力、应变时程和变形图。结果表明:在两种情况下,壁板上弹孔附近的变形特点不同,流固耦合作用明显提高了箱体的应力应变水平,增加了结构全面破坏的可能性。

2005 年,陈刚<sup>[18]</sup> 用 MSC. Dytran 对同一模型在两种子弹初速度、子弹形状以及子弹正射和斜射下箱体的动态响应过程进行了模拟。表明高速子弹在液体中穿梭能产生更大的压力脉冲,在箱壁上产生更高的动态应力,增加了油箱全面破坏的可能性;相同初始速度和相同质量的两种子弹,半球头子弹垂直击穿前壁板比圆柱形子弹对箱体壁板破

坏程度和破坏范围更大;子弹  $60^\circ$  入射时,在前壁板产生的应力应变与垂直入射时无较大差异,但在与穿出壁板的撞击中,斜射的子弹会增加箱体壁板破坏程度和高应力影响的范围。

2008 年, D. Varas 等<sup>[19]</sup> 利用 LS-DYNA 对水锤效应进行了数值模拟,在模拟过程中突破性地选择了 ALE(任意拉格朗日欧拉算法)算法离散流体,模拟结果如图 4 所示。

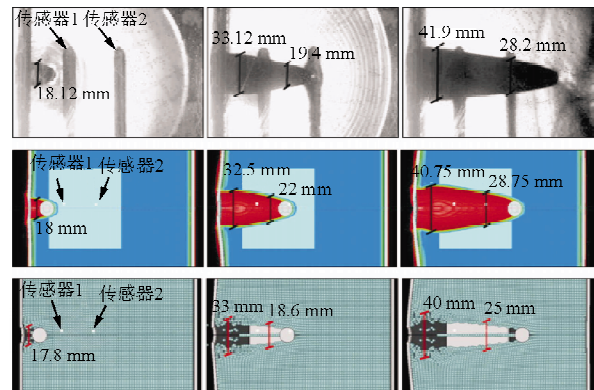


图 4 试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of the results between test and simulation

与试验结果进行对比发现:ALE 算法能如实再现水锤效应的四个阶段;空穴的变化是引起铝管变形的主要原因,变形情况与试验结果一致性较好;子弹速度时程与试验一致性较好,准确地计算了子弹传递给结构的动能。流体的离散一般分为三种方式:Euler 网格、ALE 网格、SPH 网格。欧拉网格已经成功地被反复使用,ALE 算法也得到了可靠地验证。D. Varas 等<sup>[20]</sup> 使用 SPH(光滑粒子流体动力学算法)算法对水锤效应进行模拟,计算结果与 ALE 算法结果对比发现:两种算法都能如实地再现水锤效应过程(四阶段),空穴变化过程以及铝管变形情况等等。对于不同位置的流体压力,靠近撞击点的区域,即使 SPH 粒子的密度大,ALE 算法也能更准确地算得流体压力,然而对于远离撞击点的区域,SPH 算法比 ALE 更准确;对于 ALE 算法的网格密度和 SPH 算法的粒子密度基本相同的情况,ALE 算法预测流体压力的能力比 SPH 算法更强。另外,SPH 算法对于计算机配置的要求更高,单纯提高粒子密度,将会增加计算

精度,但是会耗费更长的计算时间,所以建立比较大的物理域模型,ALE 算法更合适,对于物理域比较小的情况,SPH 算法的精度则更高。

数值模拟结果受模型精度、算法准确性的影响,所以必须结合试验进行模型修正,完善模拟过程,提高结果的准确性。

对水锤效应不同研究方法进行总结发现,试验方法固然是研究水锤效应的最直接手段,但试验研究这一复杂过程提供的信息受试验条件和测试技术的限制,因此理论分析和数值模拟成为研究该问题的重要方法;但理论分析一般引入过多的假设,适用范围有限,相比之下,数值模拟方法便成为一种有效的途径,然而该方法的准确性受到材料本构参数的影响。综上所述,单一使用一种方法并不能真正解决问题。

#### 4 结束语

综述了国内外关于水锤效应的相关研究工作,总结了研究水锤效应的不同方法,发现三种方法各有优缺点,但是都获得了一定的研究进展。由于水锤效应的复杂性,目前对其研究没有形成一套统一的试验方法,今后只有在形成一套统一的试验方法的基础之上,将试验研究、理论分析与数值模拟相结合,发挥各方法的优点,才能真正解决水锤效应问题,设计高生存力的油箱。

#### 参考文献

- [1] Varas D, López-Puente J, Zaera R. Experimental analysis of fluid-filled aluminum tubes subjected to high-velocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 81-91.
- [2] Fuhs A E, Ball R E, Power H L. FY 73 hydraulic ram studies[R]. AD776536, California: Naval Postgraduate School, 1974.
- [3] Ball R E. Aircraft fuel tank vulnerability to hydraulic ram; modification of the Northrop finite element, computer code BR-1 to include fluid-structure interaction; theory and user's manual for BR-1HR[R]. NPS-57BP74071, California: Naval Postgraduate School, 1974.
- [4] Patterson J W. Fuel cell pressure loading during hydraulic ram[R]. ADA012411, California: Naval Postgraduate School, 1975.
- [5] Bless S J, Fry P F, Barber J P, et al. Studies of hydrodynamic ram induced by high velocity spherical fragment simulators[R]. ADA055003, Ohio: University of Dayton Research Institute, 1977.
- [6] Lundstrom E A. Structural response of flat panels to hydraulic ram pressure loading[R]. ADA200410, California: Naval Weapons Center, 1988.
- [7] Lundstrom E A, Anderson T. Hydraulic ram model for high explosive ammunition[C]. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Honolulu, 1989.
- [8] Sparks C E, Hinrichsen R L, Friedmann D. Comparison and validation of smooth particle hydrodynamic (SPH) and coupled euler lagrange (CEL) techniques for modeling hydrodynamic ram[C]. 46th AIAA ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Texas, 2005.
- [9] Avery J G. Design manual for impact damage tolerant aircraft structure[R]. ADA109290, France: Advisory Group for Aerospace Research and Development Neuilly-sur-seine (FRANCE), 1981.
- [10] Nishida M, Tanaka K. Experimental study of perforation and cracking of water-filled aluminum tubes impacted by steel spheres[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(12): 2000-2016.
- [11] Disimile P J, Swanson L A, Toy N. The hydrodynamic ram pressure generated by spherical projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 821-829.
- [12] Varas D, Zaera R, López-Puente J. Experimental study of CFRP fluid-filled tubes subjected to high-velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(10): 2598-2609.
- [13] Rosenberg Z, Bless S J, Gallagher J P. A model for hydrodynamic ram failure based on fracture mechanics analysis[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, 6(1): 51-61.
- [14] Lewis M W, Kashiwa B A, Rauenzahn R M. Hydrodynamic ram modeling with the immersed boundary method[R]. W-7405-ENG-36, Los Angeles: Los Alamos National Lab., NM(United States), 1998.
- [15] Santini P, Palmieri D, Marchetti M. Numerical simulation of fluid-structure interaction in aircraft fuel tanks subjected to hydrodynamic ram penetration[R]. A98-31584, Australia: ICAS and AIAA, 1998.
- [16] Anderson Jr C E, Sharron T R, Walker J D, et al. Simulation and analysis of a 23 mm HHEI projectile hydrodynamic ram experiment[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(9/10): 981-997.
- [17] 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)
- [18] 陈钢. 高速弹丸冲击下油箱动态响应的数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学航空学院, 2005.  
Chen Gang. Numerical simulation of fuel tank response to

(4) 随着  $L/D$  的增大, 不仅各模态对应的声压幅值逐渐减小, 而且整个宽频噪声的幅值也逐渐减小。

### 参考文献

- [1] 罗柏华, 胡章伟, 戴昌晖. 流动诱导空腔振荡、空腔纯音的研究现状及展望[J]. 噪声与振动控制, 1996(4): 13-16.  
Luo Bohua, Hu Zhangwei, Dai Changhui. Present status and prospect of research on flow induced cavity oscillation and cavity tone[J]. Noise and Vibration Control, 1996(4): 13-16. (in Chinese)
- [2] 吴继飞, 罗新福, 范召林. 内埋式弹舱流场特性及武器分离特性改进措施[J]. 航空学报, 2009, 30(10): 1840-1845.  
Wu Jifei, Luo Xinfu, Fan Zhaolin. Flow control method to improve cavity flow and store separation characteristics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(10): 1840-1845. (in Chinese)
- [3] Rowley C, Williams D. Dynamics and control of high-Reynolds-number flow over open cavities annual[J]. Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 251-276.
- [4] Rossiter. Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds[EB/OL]. (1964-10-31)[2013-11-13]. <http://repository.tudelft.nl/view/aereports/uuid:a38f3704-18d9-4ac8-a204-14ae03d84d-8c/>.
- [5] 赵静, 魏英杰, 张嘉钟, 等. 不同湍流模型对空化流动模拟结果影响的研究[J]. 工程力学, 2009, 26(8): 233-238.  
Zhao Jing, Wei Yingjie, Zhang Jiazhong, et al. Effect of various turbulence models on simulated results of cavitating flow[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(8): 233-238. (in Chinese)
- [6] 夏明, 李栋, 宋笔锋, 等. 利用 DES 方法对大迎角细长旋

成体气动特性受俯仰振荡影响的数值研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(4): 372-380.

Xia Ming, Li Dong, Song Bifeng, et al. Numerical study of pitching oscillation effect on aerodynamic characteristics over a slender body using DES[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(4): 372-380. (in Chinese)

- [7] Fred Mendonca, Richard Allen, Julien de Charentenay. CFD prediction of narrowband and broadband cavity acoustics at  $M=0.85$ [J]. AIAA-2003-3303, 2003.
- [8] Richard Allen, Fred Mendonca. DES validations of cavity acoustics over the subsonic to supersonic range[R]. AIAA-2004-2862, 2004.
- [9] Nichols R II, Shawn Westmoreland. Comparison of CFD approaches for simulating flow inside a weapons bay[R]. AIAA-2006-0455, 2006.
- [10] 谭玉婷, 伍贻兆, 田书玲. 基于 DES 的二维和三维空腔流动特性研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(1): 67-70.  
Tan Yuting, Wu Yizhao, Tian Shuling. Numerical simulation of 2D/3D cavity flows using DES[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(1): 67-70. (in Chinese)

### 作者简介:

谢 霖(1988—), 男, 硕士研究生, 助理工程师。主要研究方向: 气动噪声与流动控制。

艾俊强(1964—), 男, 副总设计师, 研究员。主要研究方向: 航空器发展规划、飞机总体与气动设计等。

李 权(1982—), 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞行器设计与 CFD 应用。

侯银珠(1984—), 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机高速气动力计算、气动噪声计算分析。

(编辑: 赵毓梅)

(上接第6页)

projectile impact[D]. Xi'an; School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)

- [19] Varas D, Zaera R, López-Puente J. Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to hydrodynamic ram[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 16(1): 19-28.
- [20] Varas D, Zaera R, López-Puente J. Numerical modelling of the hydrodynamic ram phenomenon[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(3): 363-374.

### 作者简介:

刘国馨(1990—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 防弹材料的数值模拟。

陈照峰(1969—), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 超高温绝热材料、隔热吸音材料。

王永健(1979—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 计算流体力学。

刘伟兰(1991—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 防弹材料的数值模拟。

(编辑: 马文静)