

直升机盒段件垂直入水数值仿真与试验^{*}

陈英华¹, 袁李斌¹, 吴希明²

(1. 中国直升机设计研究所 景德镇, 333001) (2. 中航工业集团公司 北京, 100022)

摘要 为了对直升机盒段件入水载荷进行分析,开展了模型垂直入水冲击试验,同时采用有限元-光滑粒子流体动力学(finite element method-smooth particle hydrodynamics,简称 FEM-SPH)耦合数值方法进行仿真分析,计算了不同材料构型和速度下的过载、压力及应变结果。与试验结果进行对比表明,仿真结果与试验值吻合较好,预测的结构失效破坏模式与试验结果基本一致,可为真实直升机入水冲击的结构设计提供参考。

关键词 直升机;盒段件;垂直入水;数值仿真

中图分类号 V216.2

引言

对于结构入水问题,文献[1]提出附加质量法,并建立了二维刚体结构入水的数学模型。基于此模型,Wagner 等^[2]进行了改进和发展,取得了较好结果,但由于模型过于简化,对结构弹性、空气垫及三维效应等问题难以处理,解析方法多用于简单截面结构入水的工程估算。由于直升机蒙皮一般为薄壳构型,弹性不可忽略,而截面形状复杂多变,平底带来的空气垫作用明显,因此物理试验和数值仿真方法是研究直升机结构入水主要的研究手段。Vignjevic 等^[3]对直升机地板下的金属部段高速着水过程进行仿真,建立了弹性结构和流体的耦合冲击模型,研究结果表明,与刚性地面相比,着水时结构变形吸能降低了 55%,结果与文献[1]理论值非常吻合。文献[4]开展了复合材料机身段的垂直着水试验,并与刚性地面和软土地面坠落试验结果进行比较,采用多种流固耦合仿真算法进行模拟,其结果与试验结果吻合较好,最后对网格密度和流体黏性等仿真参数进行了影响分析。Kohlgruber 等^[5]采用 FEM-SPH 耦合方法模拟水体,用体单元模拟蜂窝,考虑复合材料的失效和破损,得到冲击过程中的加速度、应力和变形分布结果,对蜂窝的分层和破坏过程进行了模拟,结果与试验基本一致。Francesconi 等^[6]进行了铝合金平板垂直入水试验,考虑结构的弹性影响,采用不同厚度和着水速度获得相应的过

载和压力响应,并研究了结构的吸能效率和失效方式。Anghileri 等^[7]对 V 型和 U 型两种构型的部段进行垂直着水试验,测量了加速度和底部压力分布,采用 SPH 粒子模拟水体进行仿真分析,获得了与试验一致的结果。陈英华等^[8]采用带滑轨的固定支架,对 4 种直升机构型的蒙皮元组件进行了不同速度下的垂直落水试验,研究了结构弹性对空气垫的影响。

为了对直升机盒段件入水载荷进行分析,并且对比不同材料构型和速度对入水动响应的影响规律,笔者采用 FEM-SPH 耦合数值方法并考虑材料的失效,对盒段件结构垂直入水过程进行建模分析,并开展结构垂直入水冲击试验进行验证,从而获得能用于真实直升机结构入水冲击载荷预测的数值仿真方法。

1 SPH-FEM 接触算法

SPH 粒子与有限单元通过定义接触的方式进行流固耦合计算,笔者采用无网格的接触方法,SPH 粒子与有限元(finite element method,简称 FEM)接触方式如图 1 所示。将有限单元的节点视为背景粒子,背景粒子的变量与相应的有限单元节点一致,如粒子质量、位置、速度和应力等^[9-10]。背景粒子只能被其他 SPH 粒子搜索,在每个时间步内,接触部分的相关信息会从背景粒子传递到有限元数据中。对于有限元部分而言,这种传递相当于施加边界条

^{*} 民机预研资助项目(MJ-2014-F-15)

收稿日期:2018-08-24;修回日期:2018-12-11

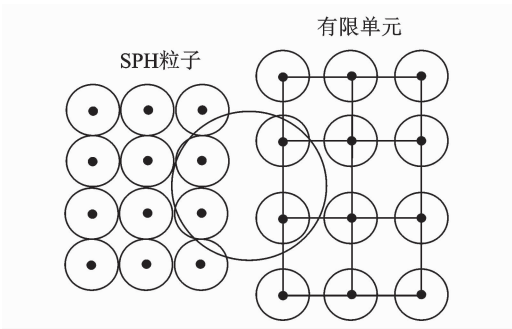


图1 SPH粒子与有限元接触

Fig. 1 SPH particles attached to the finite element method

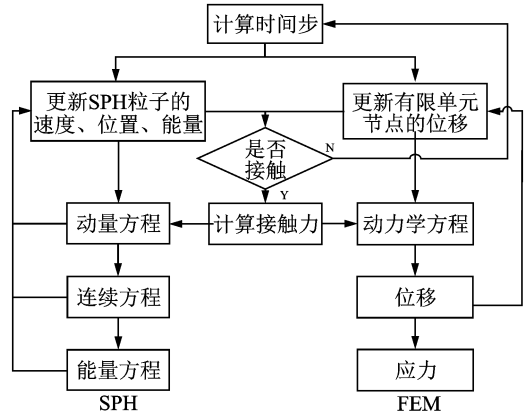


图2 SPH粒子和有限元耦合算法计算流程

Fig. 2 The solution procedure of coupled SPH-FEM algorithm

件,对于SPH部分而言,有限单元节点转化为邻近粒子,从而避免了边界影响,使得SPH粒子与有限元之间有很好的连续性。

位于有限元节点支持域内的SPH粒子对该节点产生接触力,同时位于SPH粒子支持域内的有限元节点也会对该粒子产生接触力。接触势能定义为

$$\varphi(x) = \sum_j^{N_{COUT}} \frac{m_j}{\rho_j} K \left(\frac{W(r_{ij})}{W(\Delta P_{avg})} \right)^n \quad (1)$$

接触力为

$$f(x_i) = \sum_j^{N_{COUT}} \frac{m_i}{\rho_j} \frac{m_i}{\rho_i} K n \frac{W(r_{ij})^{n-1}}{W(\Delta P_{avg})^n} \nabla_{x_i} W(r_{ij}) \quad (2)$$

其中: N_{COUT} 为粒子*i*的邻近粒子数; ΔP_{avg} 为粒子间光滑长度的平均值; K 为接触罚刚度; W 为光滑函数(当 X_A, X_B 属于相同个体时, $W(x_A - x_B) = 0$); r_{ij} 为粒子间距。

对于SPH粒子,接触力施加到动量方程

$$\frac{dv^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j} - \Pi_{ij} \right) \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} - \frac{f(x_i)}{m_j} \quad (3)$$

其中: Π_{ij} 为人工黏度项。

对于有限单元,接触力被作为外力施加到动力学方程

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f}(x_i) \quad (4)$$

其中: $\ddot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{u}$ 为加速度、速度和位移; $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

SPH粒子和有限元接触的计算步骤如图2所示。

2 数值仿真

2.1 结构模型建立

仿真采用Hyperworks软件的Radioss求解器,在Hypermesh软件中根据几何数模中面建立有

限元模型。其中:复材面板、金属蒙皮及金属角材采用壳单元模拟;复合材料盒段件模型蜂窝采用实体单元Solid模拟;不同部件之间的铆钉连接关系通过Spring单元模拟。结构网格尺寸为10mm,通过Rbody单元赋予质量,总质量为500kg,试验件结构有限元模型如图3所示。其中,复合材料蜂窝夹层结构根据蜂窝夹层结构的铺设层数不同,分别建立不同的复合材料层压板属性。复合材料单层采用/MAT/LAW25 (COMPSH),属性为P11_SH_SANADW,蜂窝夹芯采用/MAT/LAW28 (HONEYCOMB),属性为P6_SOL_ORTH。

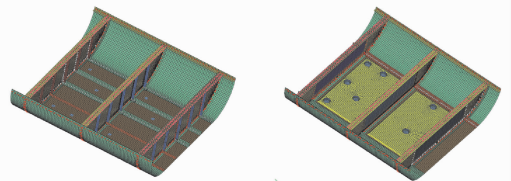


图3 金属和复合材料盒段件有限元模型

Fig. 3 FEM model of metal and composite box segment

2.2 水域建模

根据试验水域建立水体模型,为了提高计算效率,水域采用SPH-FEM混合建模方法。在盒段件入水撞击区域采用SPH单元建模,在水体边界采用实体单元建模,水体粒子间距为10mm。SPH水体与实体单元实体通过TIED接触进行连接。其中:水体SPH模型材料采用/MAT/LAW6 (HYDRO),属性为PROP_SPH;水体实体单元采用/MAT/LAW6 (HYDRO)。采用线性多项式Polynomial状态方程,压力为

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu)E_n \quad (5)$$

其中: $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ 为材料常数; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$

为密度变化率; E_n 为单位体积内能。

结构与水体流固耦合通过 TYPE7 接触实现, 结构在与粒子靠近过程中产生接触力, 该载荷是双向作用, 根据水体变形以及结构变形, 相应的接触面也在进行变化, 从而实现结构与水体的耦合。建立结构与水体耦合模型如图 4 所示。

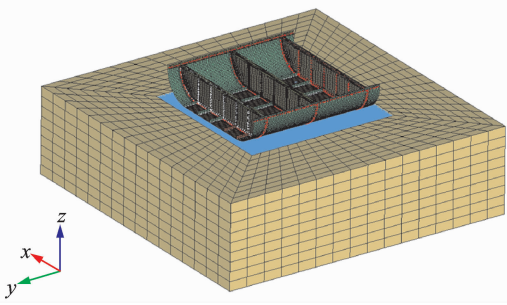


图 4 结构与水体耦合模型

Fig. 4 The coupling model of structure and water

2.3 材料失效模式

金属盒段在高速入水冲击过程中发生塑性变形, 材料本构模型考虑材料塑性和应变率强化。Johnson-Cook 模型具有材料参数物理意义明确、材料参数相对简单及通用性强等优点, 能反映应变硬化、应变率强化效应, 适用于描述金属材料在大变形、高应变率下的变形和失效行为。因此, 选择该模型作为金属材料在高应变率下的仿真本构模型

$$\sigma = (A + B\tilde{\epsilon}^n)(1 + C\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)) \quad (6)$$

其中: A 为屈服应力; B 为应变硬化系数; $\tilde{\epsilon}^n$ 为等效塑性应变; n 为应变硬化指数; C 为应变率系数; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率。

复合材料蔡-胡失效准则采用塑性功判断

$$F = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_2^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{44}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \leq F(W_p/W_{ref}^p) \quad (7)$$

$$\begin{cases} F_1 = -1/\sigma_{1y}^c + 1/\sigma_{1y}^t \\ F_{22} = 1/\sigma_{2y}^c\sigma_{2y}^t \\ F_2 = -1/\sigma_{2y}^c + 1/\sigma_{2y}^t \\ F_{44} = 1/\sigma_{12y}^c\sigma_{12y}^t \\ F_{11} = 1/\sigma_{1y}^c\sigma_{1y}^t \\ F_{12} = -\alpha/2\sqrt{F_{11}F_{22}} \end{cases} \quad (8)$$

$$F(W_p/W_{ref}^p) = (1 + b(W_p/W_{ref}^p)^n) \quad (9)$$

其中: F 为屈服包络函数; σ_i, σ_{ij} 分别为 i 方向正应力和剪切应力; $\sigma_{iy}^c, \sigma_{iy}^t$ 分别为 i 方向压缩和拉伸以及剪切许用应力; α 为 F_{12} 缩减因子; W_p 为塑性功; W_{ref}^p 为参考塑性功; b 为塑性功的硬化参数; n 为硬化指数。

对任何复合材料, b, n 和 W_{ref}^p 的值可以由经验固定。根据仿真分析大致得到 W_p 在 $0 \sim 0.03$ 之间, 所以对任何形式的复合材料铺层适用性强。

2.4 仿真结果

盒段件模型分别以 1.5 m/s 和 5.5 m/s 的速度垂直入水冲击, 通过 /INIVEL 卡片和 /GRAV 卡片设置速度和重力加速度。不同盒段件以 5.5 m/s 速度入水的仿真过程如图 5, 6 所示。从仿真结果可以

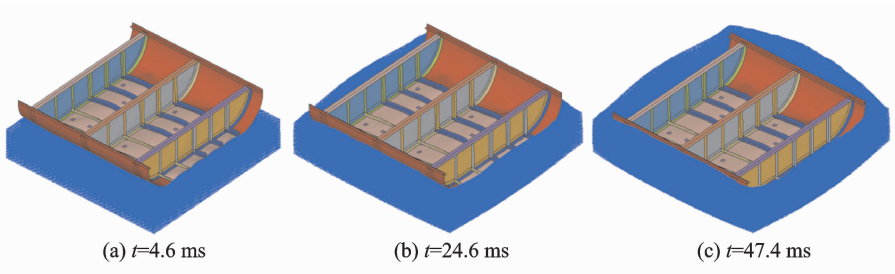


图 5 金属蒙皮盒段件以 5.5 m/s 速度入水的仿真过程

Fig. 5 The watering process of metal segment at 5.5 m/s

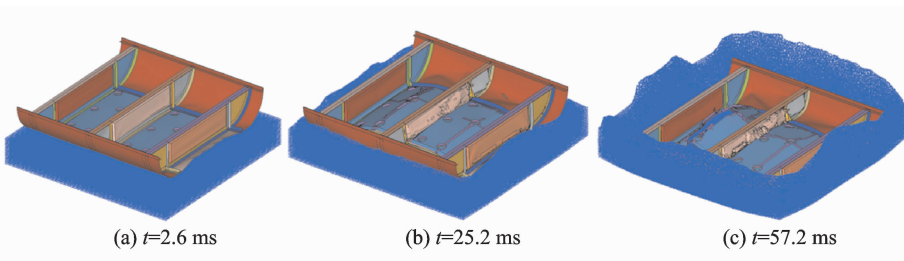


图 6 复材蒙皮盒段件以 5.5 m/s 速度入水的仿真过程

Fig. 6 The watering process of complex segment at 5.5 m/s

看出,盒段件触水后,由于结构与水面之间的部分空气无法及时逃逸而被压入水中,在底部蒙皮处形成空气层并产生压力,使得蒙皮向内变形,同时液面迅速隆起并产生飞溅。随着入水深度和变形的增加,结构局部区域产生了残余变形和失效,底部复合材料蜂窝的内蒙皮在最大变形处的孔边形成高应力区,产生裂纹,随后被撕裂破坏。

3 盒段件垂直入水试验

3.1 试验件及试验装置

为了对仿真结果进行验证,笔者开展了垂直入水试验,试验件截取某民用直升机中机身段底部结构并取消结构上大开口,包括3个框、两侧及底部蒙皮,通过连接件铆接而成,试验件尺寸如图7所示。

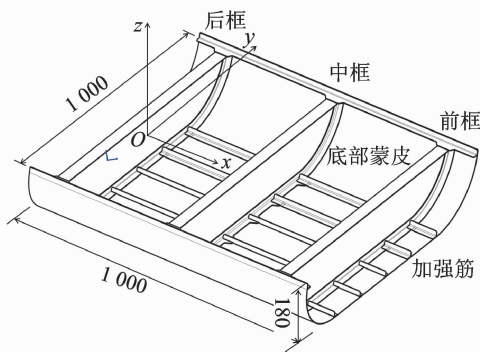


图7 试验件模型结构(单位:mm)

Fig.7 The structure of test model (unit: mm)

试验件通过螺栓固定在滑行装置底部,滑行装置与吊绳之间采用电磁投放器控制,滑行装置四周采用轮子与导向装置连接以控制试验件入水姿态,设有安全保护装置(拦截索)防止滑行装置及试验件沉没,试验装置安装如图8所示。试验盒段件结构的水质量主要由试验盒段件模型、安装的传感器及滑行装置等组成。为了保证试验盒段件结构质量与重心位置达到要求,通过在试验滑行装置顶部对称位置加装两块同形状的裁切钢板。

3.2 传感器布置

为了测试盒段件模型入水时的加速度和压力随时间历程以及应变,需要布置加速度传感器、压力传感器以及应变片。如图9所示,在盒段件中间框凸缘中点处、首框和尾框凸缘两端各安装一个加速度传感器测量垂直方向过载,共布置5个加速度传感器,量程为50g。

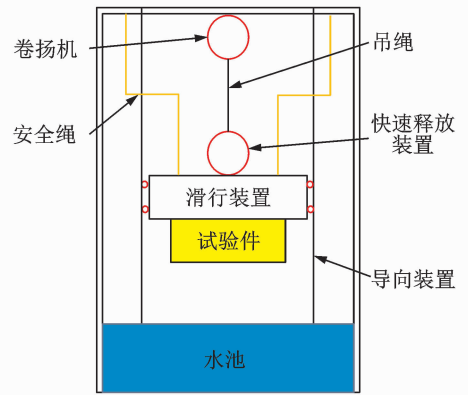


图8 盒段件入水冲击试验装置安装图

Fig.8 Installation of box segment for watering impact test

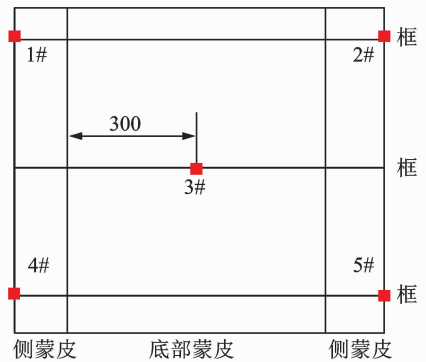


图9 加速度传感器布置图(单位:mm)

Fig.9 Layout of acceleration sensors(unit: mm)

如图10所示,在试验件上布置13个压力传感器。与角材干涉时避开角材布置,压力传感器的量程为500kPa。应变片布置位置参考文献[11],在试验件底部布置4个三向应变花(1~4号),在中间框腹板上布置2个垂向应变片(5~6号),应变片量程为15000微应变,如图11,12所示。

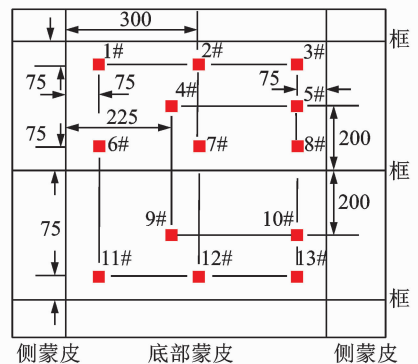


图10 压力传感器布置图(单位:mm)

Fig.10 Layout of pressure sensors(unit: mm)

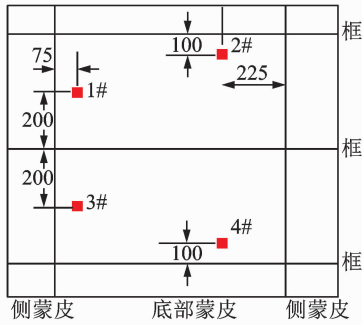


图 11 金属盒段件 1~4 号应变片俯视布置图(单位:mm)

Fig. 11 Layout of No. 1~4 strain films of top view (unit: mm)

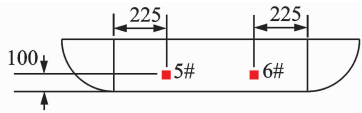


图 12 5~6 号应变片侧视布置图(单位:mm)

Fig. 12 Layout of No. 5~6 strain films of side view (unit: mm)

3.3 试验过程

根据盒段件的构型和入水速度,试验分为 4 个工况,构型为金属蒙皮和复合材料蜂窝蒙皮两种,垂直入水速度获取方式为自由落体,取 1.5 m/s 和 5.5 m/s 共 2 个速度(对应模型最低点距静水面高度分别为 120 ± 1 mm 和 $1\ 542 \pm 1$ mm,通过桁车起吊机调整,钢直尺测量)。为保证盒段件模型入水速度满足试验要求,在垂直投放水池玻璃观察窗上粘贴 E 字型刻度(每个 E 字高为 0.05 m)。入水试验速度标定如图 13 所示。每个工况试验件的总质量都设为 500 kg,试验工况和入水实测速度如表 1 所示。采用高速摄像机记录试验件入水过程,如图 14 所示。



图 13 入水试验速度标定

Fig. 13 The calibration of the water entry velocity

表 1 试验工况及实测速度

Tab. 1 Test cases and the real velocity

编号	试验件	理论入水速度/($m \cdot s^{-1}$)	实测入水速度/($m \cdot s^{-1}$)	误差/%
1	金属	1.5	1.475	1.7
2	金属	5.5	5.429	1.3
3	复合材料	1.5	1.477	1.5
4	复合材料	5.5	5.430	1.3

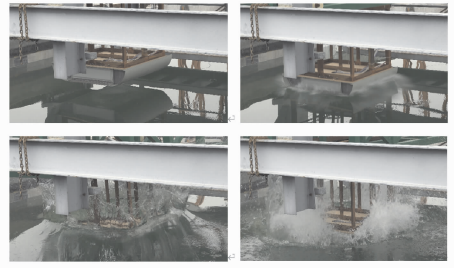


图 14 试验件垂直入水过程

Fig. 14 The vertical watering process of test model

4 试验与仿真对比

在试验件入水冲击后,用吊绳将试验件吊起并检查。其中:工况 1 和工况 3 在低速试验后,盒段件结构未发生明显变形,各传感器也均未脱落;工况 2 和工况 4 在高速试验后,试验件发生明显的残余变形,复合材料试验件底部蜂窝与框连接处发生破坏,一侧蒙皮内表面铺层和蜂窝出现明显开裂,如图 15 所示。将不同盒段件高速入水冲击后结构变形及破坏与仿真结果进行比较,如图 16,17 所示。可以看出,仿真变形结果与试验非常吻合,以 5.5 m/s 速度入水后,金属盒段件产生了明显的残余变形,最大变

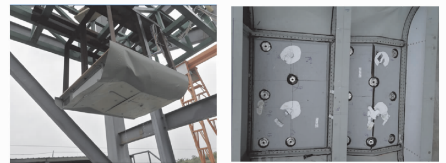


图 15 复合材料盒段件入水试验后的照片

Fig. 15 Photographs of composite box segment after test

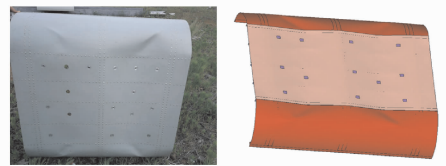


图 16 金属盒段件变形仿真与试验对比

Fig. 16 Comparison of simulation and test deformation of metal box segment

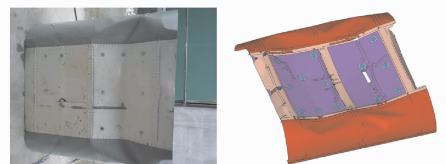


图 17 复材盒段件变形仿真与试验对比

Fig. 17 Comparison of simulation and test deformation of composite box segments

形处为框之间的中心蒙皮处;复合材料盒段件变形形状与试验结果基本一致,框之间处蜂窝蒙皮中心变形最大,在一侧蒙皮中心区域和端部蒙皮与框连接处发生了破坏,这表明冲击过程中载荷先作用到蒙皮上,再向周边框传递,蒙皮变形吸收了主要的能量。入水试验后将结果数据进行分析,根据试验采

样率选择 50Hz 滤波频率,对过载、压力和应变数据进行了滤波去毛刺处理,并与仿真结果进行对比。各工况下对比曲线如图 18~20 所示。

从对比曲线图可以看出,仿真与试验结果的过载、压力和应变的变化趋势基本一致,峰值出现的时刻和持续时间也大致相同,结构以 1.5 m/s 低速入

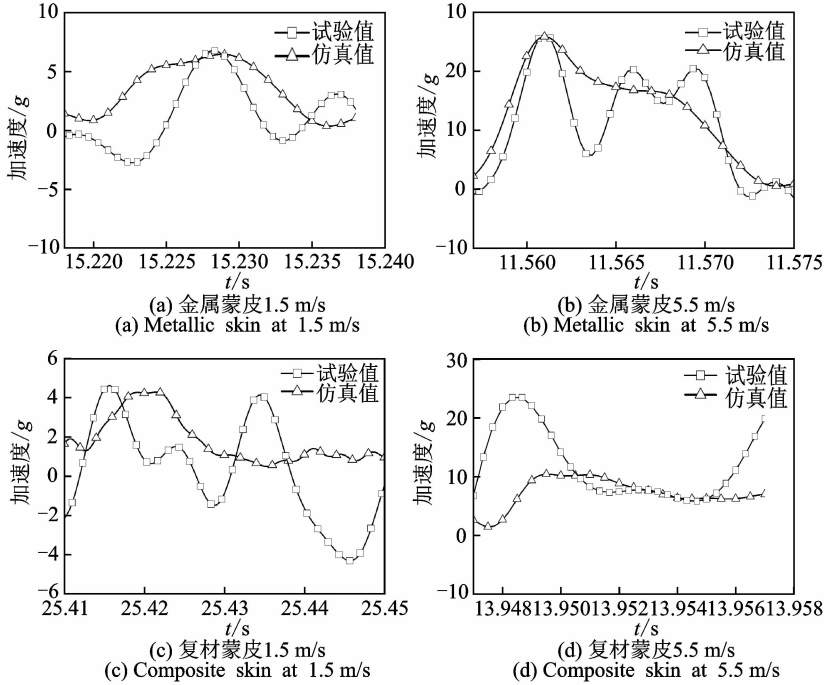


图 18 不同工况下过载仿真结果与试验对比曲线(3#测点)

Fig. 18 Time history comparison of overload between simulation results and test in different cases (sensor No. 3)

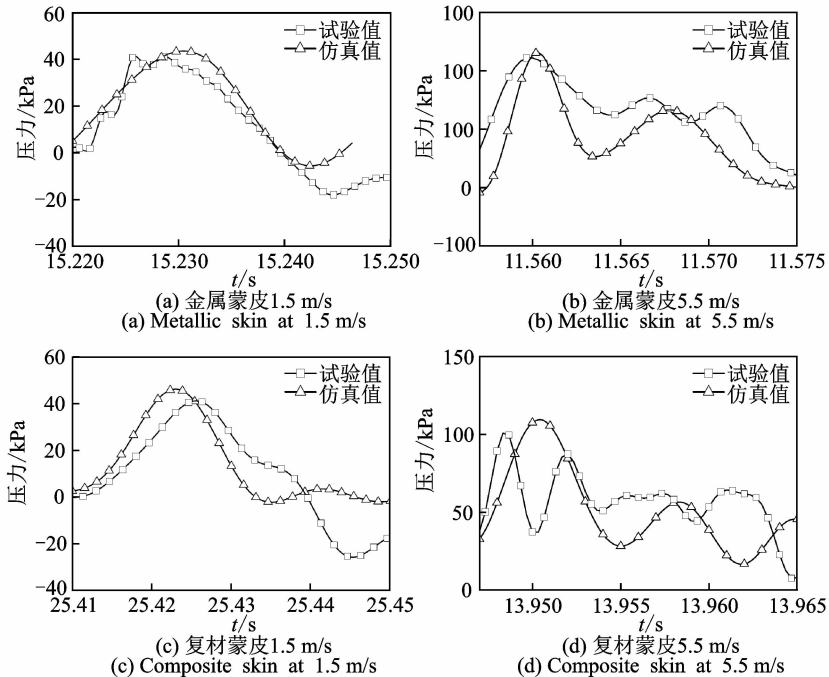


图 19 不同工况下压力仿真结果与试验对比曲线(1#测点)

Fig. 19 Time history comparison of pressure between simulation results and test in different cases (sensor No. 1)

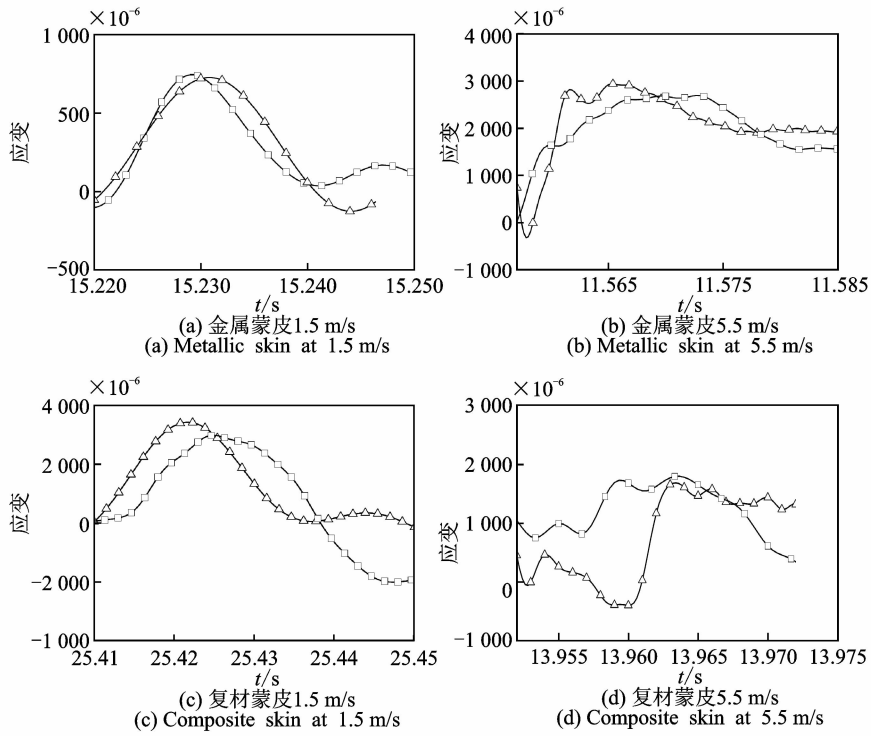


图 20 不同工况下应变仿真结果与试验对比曲线(1#测点)

Fig. 20 Time history comparison of strain between simulation results and test in different cases (sensor No. 1)

水时,接触力在触水后 10 ms 左右达到最大,然后衰减,当以 5.5 m/s 高速入水时,接触力到达峰值时间减小至 4 ms 左右。由于高速时结构发生了失效,特

别是复材蒙皮,仿真结果的过载等变化曲线与试验出现一定差异。所有工况下过载、压力和应变峰值的仿真结果与试验值对比如表 2 所示。

表 2 仿真与试验结果对比

Tab. 2 Comparison of dynamic response peak between Simulation and test results

工况	过载/g			压力/kPa			应变 $\times 10^{-6}$		
	仿真	试验	误差/%	仿真	试验	误差/%	仿真	试验	误差/%
金属蒙皮 1.5 m/s	6.5	6.8	4.4	43.9	41.0	7.1	750.0	730.0	2.7
金属蒙皮 5.5 m/s	25.9	26.2	1.1	230.0	220.0	4.5	2 930.0	2 680.0	9.3
复材蒙皮 1.5 m/s	4.3	4.6	6.5	46.0	41.2	11.6	3 200.0	3 000.0	6.7
复材蒙皮 5.5 m/s	10.3	23.5	43.8	120.0	100.0	20.0	5 500.0	16 000.0	65.6

从表 2 可知,金属蒙皮盒段件入水时,仿真结果的过载、压力和应变峰值与试验吻合良好。低速时过载峰值为 6.5 g,测点 1 的压力峰值为 43.9 kPa,误差分别为 4.4%和 7.1%;5.5 m/s 入水时最大过载为 26.2 g,最大压力为 220 kPa,误差分别为 1.1%和 4.5%。复材蜂窝结构仿真结果误差相对较高,低速时过载峰值为 4.3g,测点 1 的压力峰值为 46.0 kPa,误差分别为 6.5%和 11.6%;5.5 m/s 入水时最大过载为 10.3 g,最大压力为 120 kPa,误差分别为 43.8%和 20.0%,应变误差最大为 65.6%。

5 结 论

1) 入水仿真的入水过程与试验现象基本一致,结构触水后液面产生较大变形,水体发生飞溅,随着入水速度的增加,飞溅现象越明显。以 5.5 m/s 速度入水后,盒段件底部变形和破损情况与试验结果吻合良好,破坏位置基本一致,仿真采用 Johnson-Cook 模型和蔡-胡塑性功失效准则能较好地分别适用于金属和复合材料受冲击载荷下的结构失效,对盒段件高速入水后的危险部位进行预测。

2) 盒段件入水仿真结果的加速度过载、压力和应变与试验值变化趋势和峰值吻合较好,在相同入水速度下,复合材料蒙皮的仿真误差明显大于金属蒙皮。以 1.5 m/s 低速入水时,金属蒙皮和复合材料蒙皮的最大过载分别为 6.5 g 和 4.3 g,误差为 4.4% 和 6.5%;当以 5.5 m/s 速度入水时,过载峰值分别为 25.9 g 和 10.3 g,误差为 1.1% 和 43.8%。这是由于相比于金属材料,一方面复合材料性能参数易受其加工成型工艺的影响而波动;另一方面,高速冲击下复合材料发生失效时,特别是发生了破损,破损的发生时刻、蜂窝结构的变形吸能和表面压力变化等比较复杂,仿真用的有限元单元模型和失效定义与实际的情况尚存在差异^[12]。

3) 同样入水速度下,复合材料蒙皮盒段件的冲击过载峰值明显小于金属蒙皮。以 1.5 m/s 入水时,最大过载分别为 4.6 g 和 6.8 g;以 5.5 m/s 入水时,最大过载分别为 23.5 g 和 26.2 g。这表明复合材料蜂窝结构具有更好的缓冲作用,在直升机入水冲击结构设计应用中具有一定优势。

参 考 文 献

- [1] VON KARMAN T. The impact of seaplane floats during landing[R]. Washington D C, USA: National Advisory Committee for Aeronautics, 1929.
- [2] WAGNER V H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces [J]. Z Angew Math Mech, 1932, 12(4):193-215.
- [3] VIGNJEVIC R, MEO M. Simulation of helicopter under-floor structure impact on water[J]. International Journal of Crashworthiness, 2001, 6(3):425-443.
- [4] FASANELLA E L, JACKSON K E. Water impact test and simulation of a composite energy absorbing fuselage section[C]// American Helicopter Society 59th Annual Forum. Phoenix: [s. n.], 2003.
- [5] KOHLGRUBER D, VIGLITTI A, WEISSBERG V, et al. Numerical simulation of a composite helicopter sub-floor structure subjected to water impact[C]// American Helicopter Society 60th Annual Forum. Baltimore: [s. n.], 2004.
- [6] FRANCESCONI E, PITTOFRATI M, ANGHILERI M. Water impact drop tests on metallic skin panels and numerical simulations with ALE and SPH approaches [C]// The 20th National Congress of AIDAA. Milan: [s. n.], 2009.
- [7] ANGHILERI M, CASTELLETTI L M L, FRANCESCONI E, et al. Rigid body water impact-experimental tests and numerical simulations using the SPH method[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38:141-151.
- [8] 陈英华,吴希明,袁李斌. 直升机典型元组件垂直入水试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(2): 186-192.
- CHEN Yinghua, WU Ximing, YUAN Libin. Experimental research on vertical water entry of helicopter typical components[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(2): 186-192. (in Chinese)
- [9] 卢鸣飞,华诚. 基于 FEM-SPH 耦合算法的飞机水上迫降的力学建模与分析[J]. 复旦大学学报(自然科学版), 2013, 52(5):583-591.
- LU Mingfei, HUA Cheng. Model and numerical simulations of water ditching by FEM-SPH coupling method [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2013, 52(5):583-591. (in Chinese)
- [10] 张志春,强洪夫,高巍然. 一种新型 SPH-FEM 耦合算法及其在冲击动力学问题中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3):243-249.
- ZHANG Zhichun, QIANG Hongfu, GAO Weiran. A new coupled SPH-FEM algorithm and its application to impact dynamics[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(3):243-249. (in Chinese)
- [11] 赵刚,李书欣,刘立胜,等. 应变片在复合材料低能量冲击定位中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(3): 526-530.
- ZHAO Gang, LI Shuxin, LIU Lisheng, et al. Low energy impact localization of composite materials based on resistance strain gauge[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(3):526-530. (in Chinese)
- [12] 陈雪峰,杨志勃,田绍华,等. 复合材料结构损伤识别与健康监测展望[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 1-10.
- CHEN Xuefeng, YANG Zhibo, TIAN Shaohua, et al. A review of the damage detection and health monitoring for composite structures[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 1-10. (in Chinese)



第一作者简介:陈英华,男,1986年10月生,博士、高级工程师。主要研究方向为直升机设计。曾发表《直升机典型元组件垂直入水试验研究》(《南京航空航天大学学报》2018年第50期)等论文。
E-mail: cyhj2336@163.com

