

doi: 10.7690/bgzd.2022.01.018

基于 LS-DYNA 的弹体入水过程冲击响应仿真

程 伟, 汪 衡, 熊国松, 文 件, 张 团

(重庆红宇精密工业集团有限公司第一研究所, 重庆 402760)

摘要: 针对新型破障炮弹、助飞鱼雷等入水武器装备研制需求, 开展弹体入水过程的冲击响应数值模拟, 对比分析弹头形状、入水初速和入水角度对速度衰减及过载响应等产生的影响。仿真结果表明: 平头弹速度衰减最快, 锥头弹次之, 圆头弹衰减最慢; 圆头弹过载峰值最小, 其头形结构最利于水中运动的稳定; 入水初速越大, 速度衰减越快, 弹体所荷载荷增加也越明显; 圆头弹倾斜 60° 入水时, 前期速度衰减相对较慢, 后期加快, 过载峰值相对较低。该仿真可为弹体设计和入水初态选择提供理论参考。

关键词: LS-DYNA; 流固耦合; 入水响应; 数值模拟

中图分类号: TJ6 **文献标志码:** A

Impact Response Simulation of Projectile in Water Entry Based on LS-DYNA

Cheng Wei, Wang Heng, Xiong Guosong, Wen Jian, Zhang Tuan

(No. 1 Research Institute, Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the development of new water entry weapons such as barrier-breaking projectiles and fly-assisted torpedoes, the numerical simulation of the shock response of projectiles during water entry is carried out, and the effects of warhead shape, water entry initial velocity and water entry angle on velocity attenuation and overload response are compared and analyzed. The simulation results show that the flat-headed projectile has the fastest attenuation speed, followed by the cone-headed projectile, and the round-headed projectile has the slowest attenuation and the smallest overload peak, its head structure is most conducive to the stability of water movement; the greater the initial velocity of entry, the faster the velocity decay, the load on the projectile increases more obviously; when the round-headed projectile enters the water at 60 degrees, the speed attenuation is relatively slow in the early stage, and the overload peak is relatively low. The research results can provide the theoretical reference for the design of the projectile and the selection of the initial state of entering the water.

Keywords: LS-DYNA; liquid-solid coupling; water entry response; numerical simulation

0 引言

近年来, 破障炮弹、火箭弹以及助飞鱼雷等入水武器装备得到了快速发展。此类武器装备在入水过程中伴随着强烈的流固耦合作用, 流体和弹体之间会产生强大的非对称作用力, 其引起的结构变化和弹道偏移会严重影响武器装备的作战效能; 因此, 基于典型弹丸开展弹体入水过程特性仿真, 获取弹体入水过程冲击响应规律, 可为此类武器装备弹体设计和入水初态选择提供理论参考。

入水过程由于水-气界面在不断变化, 边界条件较为复杂, 一般采用数值分析方法求解。目前, 有限元法在流固耦合动力学分析中得到了大量应用, 其中基于显示积分有限元软件 LS-DYNA 的 ALE 算法, 是当前国内外学者认可度最高的流固耦合数值计算方法^[1-6]。陈诚等利用轻气炮设备开展了平头、半球形、截卵形等不同形状的小型弹丸水平入

水的空泡扩展相关特性试验与仿真研究^[7]。孟庆昌等采用了动网格技术开展了函数高速射弹垂直入水空泡形态及水动力特性研究^[8]。高英杰等采用双向流固耦合方法, 开展了回转体高速倾斜入水的流场特性及结构响应研究, 得到了弹体入水过程载荷特性和流场演变^[9]。

笔者基于非线性动力学有限元软件 LS-DYNA 开展了典型弹体以不同头部形状、速度和角度入水的过程研究, 并对速度衰减、过载响应、界面变化等进行分析。

1 基于 ALE 网格的流固耦合算法

实体结构的有限元计算普遍采用 Lagrange 列式, 其单元网格与结构是重叠的, 且网格随着结构变形而变形。为解决流固耦合中材料网格畸变严重的问题, 选择 LS-DYNA 程序的 ALE 方法用于弹体

收稿日期: 2021-09-20; 修回日期: 2021-10-18

作者简介: 程 伟(1984—), 男, 重庆人, 硕士, 高级工程师, 从事毁伤机理与数值模拟研究。E-mail: cwgz001@163.com。

入水过程冲击响应分析。ALE 算法的优点在于能够实时跟踪物质结构边界的运动，并且吸取了 Euler 的长处，其内部网格单元是独立于物质实体而存在，但与 Euler 的不同之处在于网格可以根据定义的参数在求解过程中适当调整位置，避免了网格畸变严重的情况。该方法更适合分析入水过程冲击响应大形变问题，LS-DYNA 程序中使用 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字实现流固耦合。

2 仿真模型及参数

弹体入水过程仿真模型由空气域、水域和弹体 3 部分组成。计算时将问题进行一定简化，假定将水视作不可压缩、无旋、有势、不计粘性的流体，同时忽略重力的影响。综合考虑计算量和计算效率，采用 1/2 模型，对水域、空气域的边界设置透射边界。计算模型空气域尺寸为 1 500 mm×750 mm×750 mm，水域尺寸为 1 500 mm×500 mm×750 mm。弹体选用拉格朗日 SOLID164 实体单元，空气域和水域采用 Euler 单元。

弹体弹径为 Φ100 mm，质量为 10 kg，3 种头型弹体质心基本一致，弹体材料为 30CrMo 钢，选用 *MAT_JOHNSON_COOK 材料模型。其中平头弹体长 380.5 mm，圆头弹体头部为 2 段圆弧构成，半径分别为 25.8 mm、654.1 mm，圆柱部长 225 mm，锥形弹体长度为 400.4 mm。仿真模型如图 1 所示。

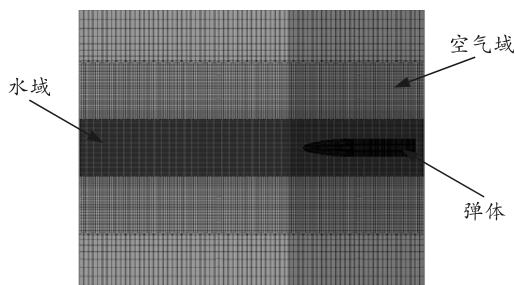


图 1 弹体入水数值计算模型

空气和水选用 *MAT_NUL 材料模型以及 Gruneisen 状态方程，参数如表 1 所示，状态方程如下：

$$p = \frac{\rho_0 C_0 [1 + (1 - \gamma_0 / 2) \mu - \alpha \mu^2 / 2]}{[1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \mu^2 / (\mu + 1) - s_3 \mu^3 / (\mu + 1)^2] + (\gamma_0 + \alpha \mu) E} \quad (1)$$

表 1 水和空气参数

物质	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C / (\text{m} \cdot \text{s})$	s_1	γ_0
水	1 000	1 650	1.92	0.35
空气	125	340	0	1.40

为便于建立弹体水下运动模型，需对弹体作以下合理假设：

- 1) 弹体入水过程忽略重力效应；
- 2) 弹体入水后不旋转；
- 3) 弹体所受阻力与速度方向相反，其方向与弹道切线重合。

3 入水过程冲击响应仿真

3.1 不同弹头形状冲击响应对比分析

选取弹体以 300 m/s 速度垂直入水为典型工况，开展平头、圆头、锥头等典型头部形状对弹体的冲击响应影响分析，弹体模型如图 2 所示。考虑到计算效率，计算时间取弹体完全没入水中为止。通过计算得到不同头部形状弹体速度-时程曲线如图 3 所示，过载-时程曲线如图 4 所示，液面变化及飞溅效应如图 5 所示。

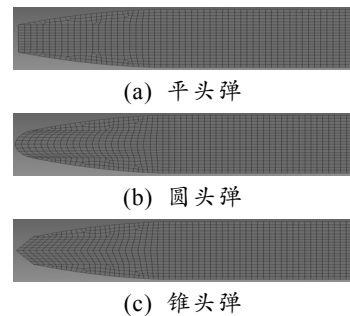


图 2 不同头形弹体模型

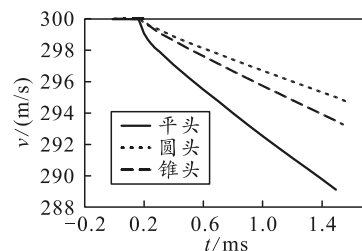


图 3 速度-时程曲线

由上图可知：3 种典型弹体以同一速度垂直入水时，平头弹入水时间为 1.49 ms，速降最大，约为 10.8 m/s；锥头弹入水时间约 1.54 ms，速度降为 6.7 m/s，次于平头型弹体；圆头弹入水时间和锥头弹体基本一致，而速度降最小，为 5.2 m/s。

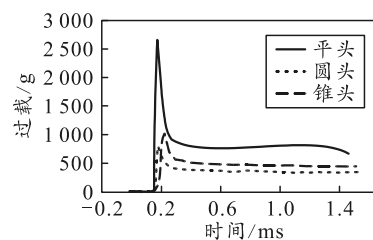
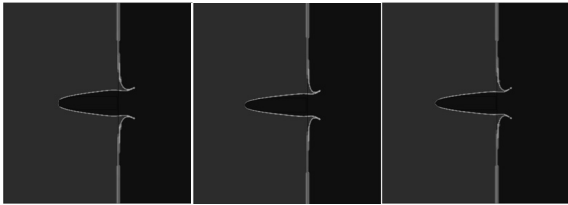


图 4 过载-时程曲线

由上图可知：平头弹在入水撞击瞬间，过载峰值达到最大，约为 2 654 g；锥头弹和圆头弹过载峰值明显低于平头弹，分别为 1 003 g 和 790 g，圆头弹所承载荷最小，较平头弹过载峰值下降约 70%，其头形结构最利于水中运动的稳定。



(a) 平头弹 (b) 圆头弹 (c) 锥头弹

图 5 不同弹形自由液面变化

由上图可知：自由水面随着入水时间增加不断上升，同时水也不断进入空气中，进而产生水花飞溅现象，并使弹体周围的水产生流动。空泡在弹体周围形成并把弹体包裹起来，直到产生超空泡，可以发现此时整个弹体只有弹体头部与水接触。在弹体入水初期，超空泡形状近似为轴对称半椭球形。平头弹液体面变化程度要明显于锥头弹体和圆头弹体，这和所受的阻力大小相关。

3.2 不同入水速度冲击响应对比分析

选取圆头弹入水初速为 200、300、400 m/s，入水姿态为垂直入水等初始条件开展不同入水速度对冲击响应的影响分析，计算时间同样取弹体完全没入水中为止。通过计算得到不同入水速度弹体速度-时程曲线如图 6 所示，过载时程曲线如图 7 所示，液面变化及飞溅效应如图 8 所示。

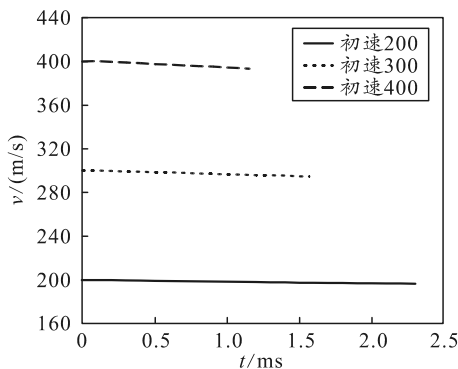


图 6 速度-时程曲线

由上图可知：以 200 m/s 初速垂直入水时，入水时间为 2.3 ms，速度降为 3.5 m/s；以 300 m/s 初速垂直入水时，入水时间为 1.55 ms，速度降为 5.2 m/s；以 400 m/s 初速垂直入水时，入水时间为 1.55 ms，速度降为 5.2 m/s。结果表明，弹体初速越大，速度衰减越快。

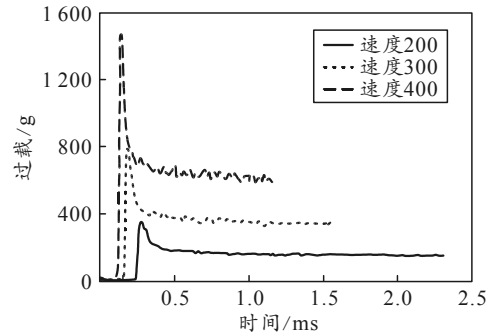
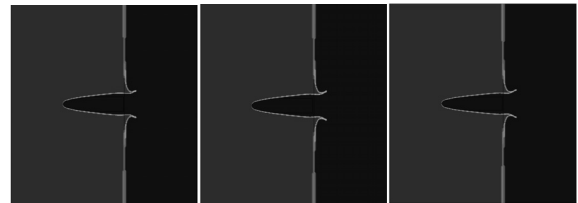


图 7 过载-时程曲线

由上图可知：圆头弹体以 200~400 m/s 初速垂直入水时过载峰值分别为 350、790 和 1 467 g，弹体以 400 m/s 入水时过载峰值是 200 m/s 入水时的 4.19 倍，速度越高，弹体所承载荷增加越明显。



(a) 200 m/s (b) 300 m/s (c) 400 m/s

图 8 不同入水初速自由液面变化

从上图可知：不同初速入水时，自由液面的水花飞溅现象基本一致，超空泡形状均近似为轴对称半椭球形；速度越高，飞溅现象略为明显，飞溅高度略高一些。

3.3 不同入水角度冲击响应对比分析

选取入水初速为 200 m/s，圆头弹以垂直、倾斜 30°、倾斜 60°等不同入水角为初始条件开展不同入水角对冲击响应的影响研究，计算时间也取弹体完全没入水中为止。通过计算得到不同入水角度弹体速度-时程曲线如图 9 所示，过载时程曲线如图 10 所示，液面变化及飞溅效应如图 11 所示。

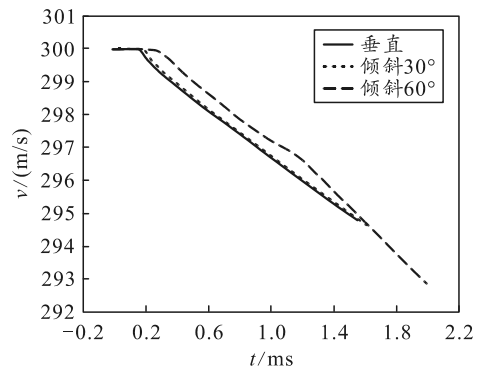


图 9 速度-时程曲线

由上图可知：弹体以 300 m/s 初速垂直入水时，入水时间为 1.55 ms，速度降为 5.2 m/s；倾斜 30°

入水时，入水时间为 1.65 ms，速度降为 5.5 m/s；倾斜 60°入水时，入水时间为 1.99 ms，速度降为 7.1 m/s。结果表明，圆头弹以垂直和倾斜 30°入水角入水时，速度衰减无较大差别，而倾斜 60°入水时，入水过程中前期速度衰减较慢，后期衰减加快。

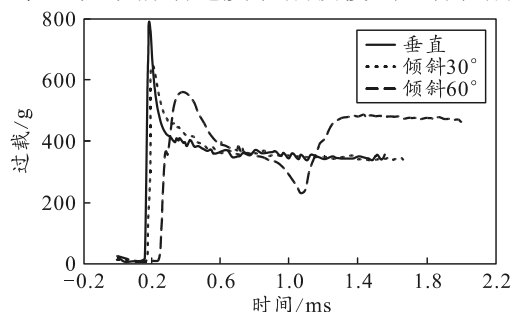


图 10 过载-时程曲线

由上图可知：圆头弹以 300 m/s 初速垂直、倾斜 30°和倾斜 60°入水时过载峰值分别为 790、727 和 558 g。结果表明，垂直和倾斜 30°入水时，过载峰值相当，而倾斜 60°过载峰值明显低于垂直和倾斜 30°入水状态。



(a) 垂直 (b) 倾斜 30° (c) 倾斜 60°

图 11 不同入水初速自由液面变化

从上图可知：当圆头弹以不同姿态入水时，倾斜角度越大，自由液面的水花飞溅现象越明显。超空泡形状与入水角度密切相关，当弹体垂直入水时，超空泡形状规则，近似为轴对称半椭球形；当弹体倾斜入水时，超空泡形状为非对称半椭球形。显然当圆头弹以倾斜 60°入水角入水时，弹道较垂直、倾斜 30°变化更大，不利于弹体发挥正常的作战效能。

4 结束语

基于 LS-DYNA 程序分析了不同弹头形状、典

型入水初速区间和入水角度等初始条件对入水时间、速度衰减、过载响应等产生的影响，得出以下结论：

1) 不同形状弹丸以 300 m/s 速度入水时，圆头弹形结构最利于水中运动的稳定，平头弹速度衰减最快，锥形弹次之，圆头弹衰减最慢，过载峰值下降约 70%；

2) 圆头弹以 200~400 m/s 速度入水时，入水初速越大，速度衰减越快，弹体以 400 m/s 入水时过载峰值是 200 m/s 入水时的 4.19 倍；

3) 圆头弹以 300 m/s 速度倾斜入水时，60°入水时的速度衰减最快，弹道变化最剧烈，要使弹丸入水正常发挥作战效能，其入水角度不应大于 60°。

参考文献：

- [1] 冯沐桦, 郭荣君, 李天雄, 等. 几何不对称对弹塑性射弹入水运动影响数值仿真[J/OL]. 弹箭与制导学报, 2021: 1-6[2021-03-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1234.TJ.20201209.1635.002.html>.
- [2] 郭子涛, 陈拓, 郭钊, 等. 弹体水平入水的空泡扩展相关特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(4): 90-94.
- [3] 汪振, 吴茂林, 戴文留. 大口径弹体高速入水载荷特性研究[J]. 弹道学报, 2020, 32(1): 15-22.
- [4] 钱钺钺, 余春华, 穆青, 等. 发射速度和发射角度对射弹高速入水流动的影响[J]. 四川兵工学报, 2019, 40(7): 35-39, 50.
- [5] 郝博, 代浩, 吕超. 高速射弹入水过程弹道与流体动力特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 21-26.
- [6] HUANG H C, SHENG C W, WU J N, et al. Hydrodynamic analysis and motion simulation of fin and propeller driven manta ray robot[J]. Applied Ocean Research, 2021, 108(2): 102528.
- [7] 陈诚, 袁绪龙, 邢晓琳, 等. 预置舵角下超空泡航行体倾斜入水弹道特性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(9): 119-124.
- [8] 孟庆昌, 易文彬, 胡明勇, 等. 高速射弹垂直入水空泡形态及水动力特性研究[J]. 中国造船, 2019(3): 12-26.
- [9] 高英杰, 孙铁志, 张桂勇, 等. 回转体高速倾斜入水的流场特性及结构响应[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12): 101-113.