

doi: 10.7690/bgzd.2016.03.004

导流机构对激波开盖后盖压强的影响仿真分析

潘 登¹, 赵修平²

(1. 海军航空工程学院研究生五队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 104 教研室, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了解决激波开盖的鱼雷发射箱在无导流隔板工况下可能会使后盖不能成功碎裂的问题, 提出 2 种导流机构的方案, 并利用 FLUENT 软件对 2 种导流机构在 2 个安装位置下的流场变化情况进行仿真分析。仿真结果表明: 较近的安装位置下 2 种导流机构均能有效降低后盖的压强峰值, 且使得后盖压强分布更加均匀; 相比之下较远的安装位置下 2 种导流机构的导流效果要差一些, 其后盖压强峰值更大, 且分布更不均匀。

关键词: 激波; 导流机构; FLUENT; 仿真分析; 后盖; 压强分布

中图分类号: TJ630.6 **文献标志码:** A

Simulation and Analysis of Effect that Fluid Guiding Structure over Pressure of Shock Wave Opening Post-Cover

Pan Deng¹, Zhao Xiuping²

(1. No.5 Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China;

2. No.104 Staff Room, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to solve the problem that the post-cover can't open successfully in shock wave opening which without the fluid guiding structure in the torpedo launch case, we come up with two schemes of fluid guiding structure, simulate and analyze the flow field change of the two schemes under two locations through the software FLUENT. The result of the simulation indicates that, both of the two schemes under nearer location can reduce the top-pressure of the post-cover effectively, and make the distribution more homogeneous; compared to the nearer location, the fluid guiding result of the two schemes under farther location is worse, its top-pressure is higher, and the distribution is less homogeneous.

Keywords: shock wave; fluid guiding structure; FLUENT; simulation and analyze; post-cover; pressure distribution

0 引言

激波开盖技术指利用鱼雷助推器点火后, 喷出的射流形成激波将易碎盖吹裂以完成开盖任务的技术^[1]。激波开盖相对于机电式开盖和液压式开盖来说, 具有质量轻、结构简单、可靠性高和维护简便等优点^[2]。在无导流隔板工况下, 鱼雷助推器点火后, 其射流形成激波直接冲击后盖, 对后盖及周围设备产生较大影响, 可能会使后盖不能正常碎裂。目前国内对这一问题还没有成熟的解决方案, 笔者提出 2 种导流机构的方案, 并对其在 2 个安装位置下的流场变化情况进行仿真研究, 证明其能改善后盖压强分布不均匀的状况, 对激波开盖方案的设计有着较为重要的意义。

1 仿真模型

1.1 计算模型

笔者以鱼雷及其发射箱作为建模依据, 计算模型包括鱼雷雷体、喷管扩张段、导流机构、发射箱

箱体、发射箱前后盖体和发射箱内腔流场。为了便于建模及计算, 对模型做如下简化:

- 1) 忽略鱼雷弹翼等部件的影响, 将鱼雷简化为简单旋转体;
- 2) 忽略发射箱内电气机电部件的影响;
- 3) 假设助推器喷出气体组分固定, 各组分不发生化学反应, 忽略固体颗粒的影响。

为便于分析, 在后盖中心及靠边缘处分别设置测点 p_1 与 p_2 , 监测其压强变化情况。模型及后盖测点如图 1 所示。

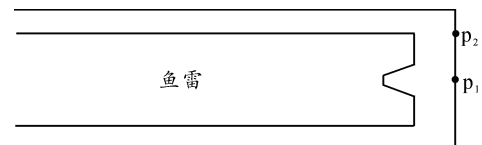
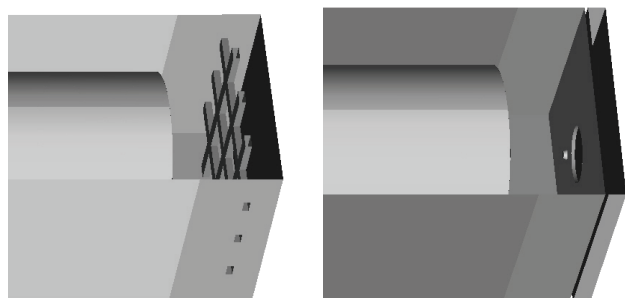


图 1 模型及后盖测点示意图

2 种导流机构方案均采取 A 和 B 安装位置, A 位置距离喷管口较近, B 位置距离喷管口较远。三维模型如图 2 所示。

收稿日期: 2015-12-02; 修回日期: 2015-12-30

作者简介: 潘 登(1986—), 男, 陕西人, 硕士, 从事发射系统工程与集成技术研究。



(a) 导流格栅工况 (b) 导流隔板工况

图2 后盖附近三维模型(B安装位置)

图3所示为导流格栅和导流隔板方案设想，图中灰色部分为导流面积，流体可以通过空白部分的通道流向后盖方向。导流隔板中间为一个突出的圆台形挡块，通过4个薄金属片支撑在隔板上方，建模时忽略金属支撑片。



(a) 格栅方案 (b) 隔板方案

图3 导流机构方案

利用ICEM-CFD软件对计算区域进行结构化网格划分，导流格栅工况的模型网格总数约为29.4万，导流隔板工况的模型网格总数约为28.6万，全部为六面体网格。

边界条件：取喷管喉部作为计算区域入口，设置为压力入口；鱼雷雷体、发射箱箱体、导流格栅及发射箱前后盖均设置为标准壁面。前后盖体在达到碎裂条件后更改为压力出口。

仿真计算中采用二阶迎风格式的耦合隐式求解器，收敛精度取 10^{-3} 。其他项采取默认设置。

1.2 控制方程

燃气流场采用求解非定长雷诺平均的N-S方程的方法进行数值模拟。其控制方程^[3-5]如下：

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}. \quad (2)$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E) = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j} - \frac{\partial p u_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (3)$$

其中： ρ 为密度， kg/m^3 ； u 为 x 坐标轴方向上的流体速度， m/s ； p 为静压， Pa ； E 为单位质量的内能， J ； q 为热通量， $q = -\lambda \partial T / \partial x$ ， T 为温度， λ 为热传导系数。

湍流模型采用Realizable $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型，它关于 k 与 ε 的输运方程^[6-7]如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}}. \quad (5)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \sigma_k &= 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_2 = 1.9 \\ C_1 &= \max(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}) \\ \eta &= (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \\ E_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

ε 方程中， μ_t 与 C_μ 的计算方法^[8-9]为：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (7)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S U^* k / \varepsilon}. \quad (8)$$

且有

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= 4.0 \\ A_S &= \sqrt{6} \cos \phi \\ \phi &= \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W) \\ W &= \frac{E_{ij} E_{jk} E_{ki}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}} \\ U^* &= \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \\ \tilde{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \\ \tilde{\Omega}_{ij} &= \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

这里， $\bar{\Omega}_{ij}$ 是从角速度为 ω_k 的参考系中观察到的时均转动速率张量^[10]。

2 仿真结果

以喷管喉部堵片打开为 T_0 时刻。假设后盖不打开, 考察 2 种方案下流场变化情况。图 4 是无导流机构时, 于同等计算条件下得出的后盖测点压强曲线, 用作对比。

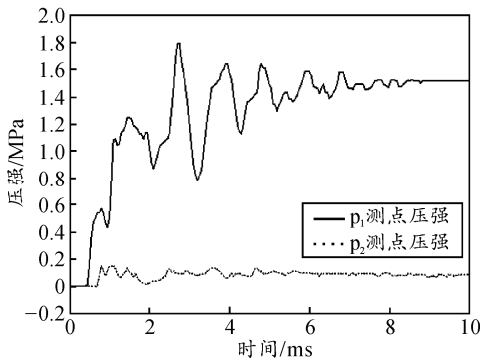


图 4 无导流机构时后盖测点压强变化曲线

2.1 格栅方案仿真结果

将 2 个位置的曲线图与图 4 对比可以发现, 2 个安装位置下均大大降低了后盖测点压强峰值, 同时也令两测点的压强差值降低到 0.5 MPa 以下。10 ms 后后盖压强趋于稳定, 在此不予显示。图 5、图 6 分别为 A、B 位置的导流格栅方案下后盖测点压强变化曲线。

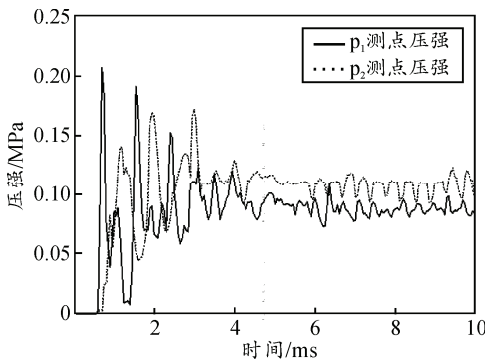


图 5 导流格栅方案下后盖测点压强变化曲线 (A 位置)

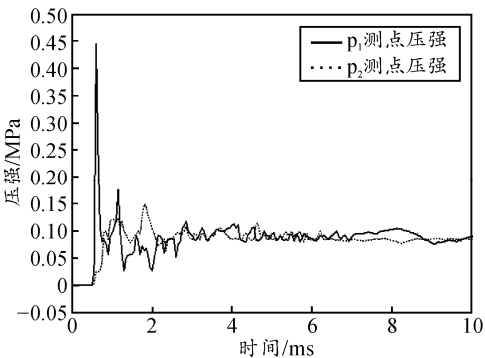


图 6 导流格栅方案下后盖测点压强变化曲线 (B 位置)

两者对比发现, A 位置安装下经过导流格栅打散的激波作用在后盖上产生的压强峰值比 B 位置安装方案下的低, 同时前者可以使得流动初期后盖上的压强分布更加均匀。图 7、图 8 的后盖压强云图也证明了这一点。

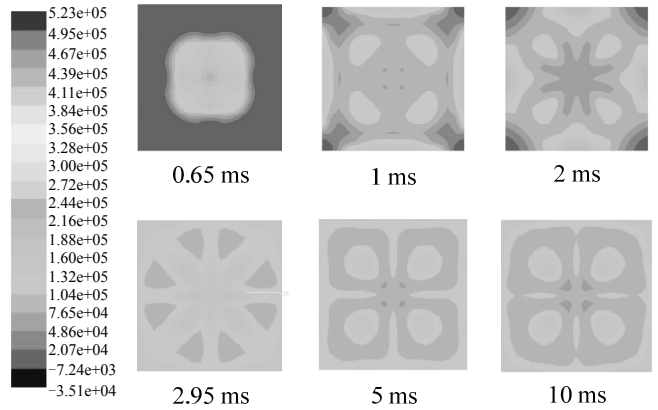


图 7 后盖压强云图 (A 位置)

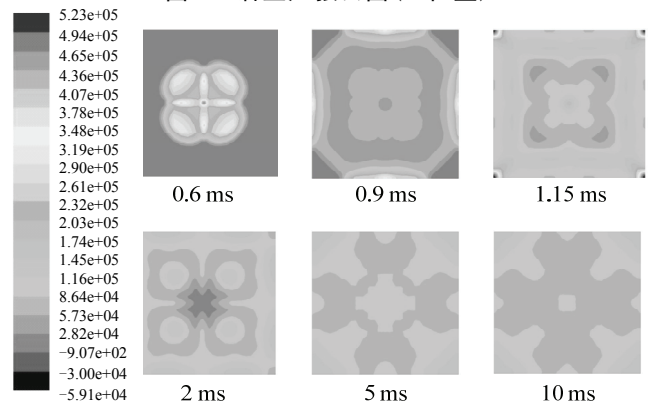


图 8 后盖压强云图 (B 位置)

2.2 隔板方案仿真结果

将隔板工况 A 位置安装 (图 9) 与隔板工况 B 位置安装 (图 10) 下, 前盖上 2 个测点的压强变化曲线与图 4 比较发现, 2 种安装位置均能降低后盖压强峰值, 也能使后盖上压强分布更加均匀。

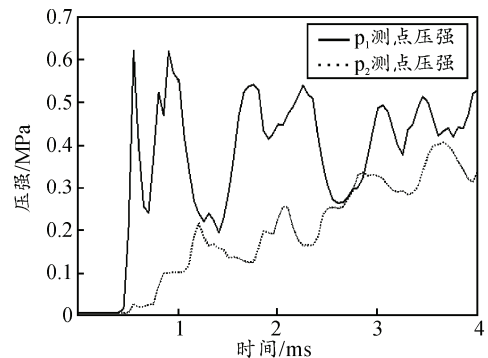


图 9 导流隔板方案下后盖测点压强变化曲线 (A 位置)

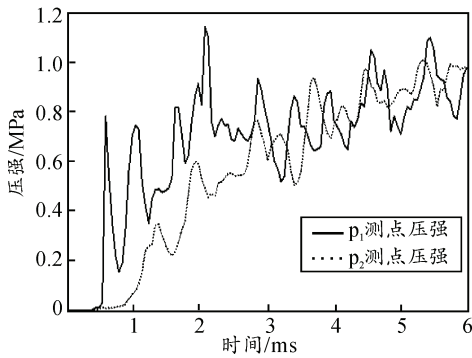


图 10 导流隔板方案下后盖测点压强变化曲线(B位置)

对比两曲线可以发现，A位置下的后盖压强峰值在0.6~0.7 MPa之间，比B位置下接近1.2 MPa的峰值低，同时流动初期A位置下两测点压强差值较小，说明流动初期A位置能使后盖压强分布更加均匀。如图11、图12，可直观地看到这种状况。

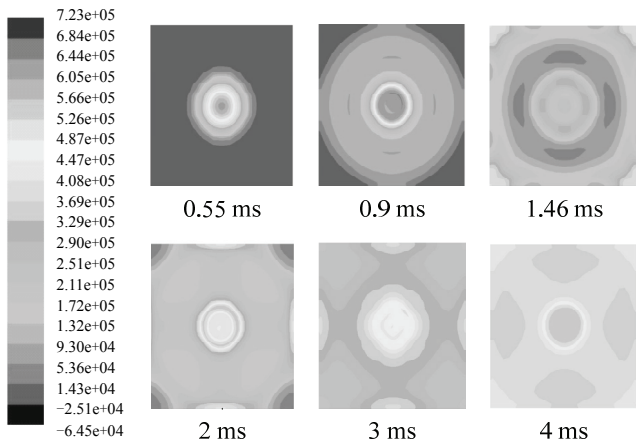


图 11 后盖压强云图(A位置)

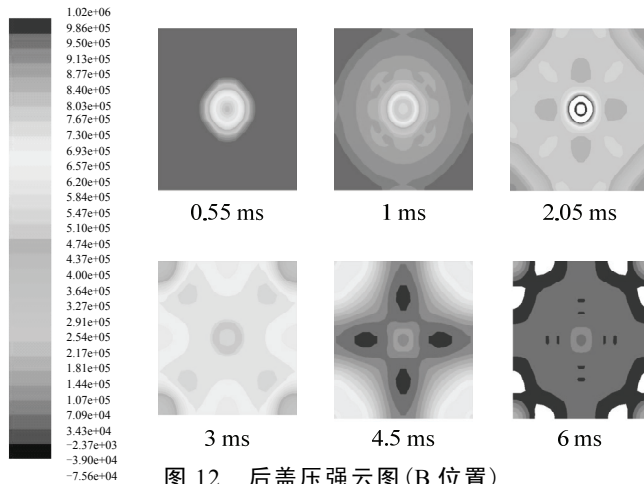


图 12 后盖压强云图(B位置)

综合考虑2种方案在2个安装位置下的后盖压强情况会发现，同方案的导流机构在A位置安装时后盖两测点压强峰值均比B位置安装时小，同时其后盖压强分布也比B位置的更均匀。如表1所示。

表 1 两导流机构方案对比

方案 安装位置	导流格栅		导流隔板	
	A	B	A	B
p ₁ 测点压强峰值	0.208	0.445	0.624	1.144
p ₂ 测点压强峰值	0.174	0.153	0.395	0.927
后盖压强分布	较均匀	欠均匀	较均匀	欠均匀

将同一个安装位置2种方案横向对比会发现，总的来说导流格栅对激波的打散效果好些，经过导流格栅的燃气作用在后盖上形成的压强比导流隔板的小一些。

3 结论

1) 导流机构能够破坏助推器燃气射流形成的激波，使得到达后盖的燃气分布更加均匀，同时有效降低后盖上的压强峰值。

2) 两导流机构对比结果显示，导流格栅对激波的打散作用比导流隔板好一些，经过导流格栅的燃气激波在后盖上形成的压强峰值比较小。

3) 两方案在2个安装位置下对比结果显示，A位置对激波的影响较大，破坏激波前沿的作用更加明显，使得后盖上压强峰值比B位置安装下小，且使得后盖上压强分布更加均匀。

4) 隔板方案较远的安装距离最不利于打散激波机构，它使得到达后盖的压强峰值较大且分布状况较不均匀，工程上应当避开此工况。

参考文献：

- [1] 傅德彬, 姜毅. 某导弹易碎盖的开启过程[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(4): 275-277.
- [2] 党海燕, 贺卫东, 鲁志刚, 等. 激波开盖中后盖开盖压力对前盖压力的影响研究[J]. 战术导弹技术, 2012(1): 54-57.
- [3] 张福祥. 火箭燃气射流动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2004: 97-99.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 65-66.
- [5] 丁欣硕, 焦楠. FLUENT 14.5 流体仿真计算从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 14-15.
- [6] 何志霞, 王谦, 袁建平. 热流体数值计算方法与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 88-90.
- [7] 吴清松. 计算热物理引论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014: 92-94.
- [8] 孙帮成, 李明高. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 11-13.
- [9] 张惠, 康士廷. FLUENT 14 流场分析自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 9-11.
- [10] 王保国, 高歌. 非定常气体动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 153-155.