

doi: 10.7690/bgzd.2019.11.018

某灵巧枪弹气动特性数值计算分析

周磊, 蔡红明

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为提高枪弹的命中精度, 对一种增程灵巧枪弹的气动特性数值计算进行分析。建立枪弹计算模型, 应用气动仿真软件 FLUENT, 采用数值仿真的方法, 分析弹头及弹尾外形尺寸变化对灵巧枪弹气动特性的影响规律, 并以国外枪弹为基础对其进行算例验证。仿真结果证明了该数值仿真方法的准确性, 可为枪弹气动特性分析提供参考依据; 随着弹尖半径的增加, 枪弹阻力系数逐渐增大, 升力及俯仰力矩系数的变化并不明显; 随着圆弧部半径的增加, 枪弹阻力系数增大, 升力系数减小, 俯仰力矩系数增大, 枪弹纵向静稳定性减弱; 随着交界处半径的增加, 枪弹阻力系数减小, 升力系数减小, 俯仰力矩系数增大, 枪弹纵向静稳定性减弱。

关键词: 兵器科学与技术; 灵巧枪弹; 气动外形; 气动特性; 数值仿真

中图分类号: TJ411 **文献标志码:** A

Numerical Evaluation and Analysis of Aerodynamic Characteristics of Certain Type Smart Bullet

Zhou Lei, Cai Hongming

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the hitting accuracy of guns and bullets, the numerical calculation of the aerodynamic characteristics of a new extended range smart bullet is analyzed. Establish a bullet calculation model and apply the pneumatic simulation software FLUENT. The influence of the shape of warhead and tail on the aerodynamic characteristics of smart bullet is analyzed by numerical simulation and validated on the basis of foreign bullets. The simulation results show that this method is correct and it can provide reference for the analysis of the aerodynamic characteristics of projectiles. With the increase of tip radius, the drag coefficient increases, the lift coefficient increases first and then decreases, and the pitching moment coefficient decreases first and then increases. With the increase of arc radius, the drag coefficient increases, the lift coefficient decreases, the pitching moment coefficient increases, and the longitudinal static stability decreases. With the increase of the radius at the intersection, the drag coefficient decreases, the lift coefficient decreases, the pitching moment coefficient increases, and the static stability decreases.

Keywords: armament science and technology; smart bullet; aerodynamic shape; aerodynamic characteristics; numerical simulation

0 引言

枪弹是由各类枪械发射的轻武器弹药, 主要用途是毁伤和引燃目标、指引和修正射击方向等。枪弹飞行姿态仅限出膛后的无控飞行。在空气阻力以及重力的影响下, 枪弹的远距离命中率会大打折扣; 因此, 如何提高枪弹的命中精度, 已成为枪弹设计师亟待解决的问题。灵巧枪弹作为精确打击的轻武器弹药, 是利用光、电、材料等高新技术产品, 对目标位置进行感知, 实现枪弹姿态实时控制^[1]。

对于灵巧枪弹的设计与研发, 国内外做了相当多的研究。高原、谷良贤、潘雷等^[2]利用多体建模方法, 建立了弹丸偏转弹头控制系统的动力学模型。高昕欣等^[3]深入研究了基于舵机姿态执行机构控制

方式与基于弹头偏角姿态执行机构控制方式的气动特性。奥伯恩大学研究了一种通过压电陶瓷材料偏转弹头提供控制力矩的身管发射式自适应枪弹, 该枪弹设计新颖, 但控制力矩偏小^[4]。桑迪亚实验室设计了一种基于激光半主动制导和尾翼偏转控制的灵巧枪弹, 并于 2012 年进行了实弹测试^[5]。

20 世纪 60 年代中期, 随着理查德提出用数值方法来解流体力学问题的思想以及计算机的问世, 计算流体力学逐渐兴起。进入 21 世纪, 计算流体力学迅速发展, 使得数值模拟^[6-9]大规模应用到枪弹流场仿真中。吴志林等^[10]设计了一种尾翼折叠式修正枪弹, 并采用数值仿真方法研究了该枪弹的气动特性。王飞等^[11]利用流体力学仿真软件 FLUENT 对弹

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-07-18

作者简介: 周磊(1993—), 男, 江苏人, 硕士, 从事流体力学、空气动力学研究。E-mail: 2810724457@qq.com。

头偏角的弹丸进行气动特性分析，具体分析了弹丸周围流场特性和弹丸表面的空气动力特性。

笔者以某灵巧枪弹弹形为基础，通过改变其气动外形来研究外形变化对枪弹气动特性的影响，采用数值仿真的方法分析了弹尖半径、圆弧半径及交界半径等外形尺寸变化对灵巧枪弹气动特性的影响规律。

1 计算模型

1.1 枪弹外形参数

笔者研究的灵巧枪弹口径为 12.7 mm。如图 1 所示，该灵巧枪弹结构包括弹尖、圆弧段、圆柱段、收缩-扩张段和尾翼等部分组成。



图 1 灵巧枪弹 3 维图

考虑到导引头的尺寸及降低阻力的要求，枪弹头部被设计成半圆-圆弧外形。同时，为方便布置尾翼并保证灵巧枪弹飞行静稳定性，灵巧枪弹尾部被设计成收缩-扩张段。取枪弹弹轴为 x 轴，方向由弹尖指向弹底， y 轴为竖直向上， z 轴由右手定则得到，原点取弹尖顶部。

1.2 计算网格分布

图 2 为灵巧枪弹周围计算域的网格示意图。对于文中的灵巧枪弹模型，笔者主要研究弹尖、圆弧部及弹尾扩张-收缩段变化对枪弹气动特性的影响；因此，在布网格时对弹头及弹尾适当加密。网格类型选择对复杂外形有较强适应性的非结构网格，计算域选取圆柱流场，长为 1 100 mm，半径为 550 mm。枪弹表面至计算域边界网格增长率为 1.1，网格数量约为 200 万。

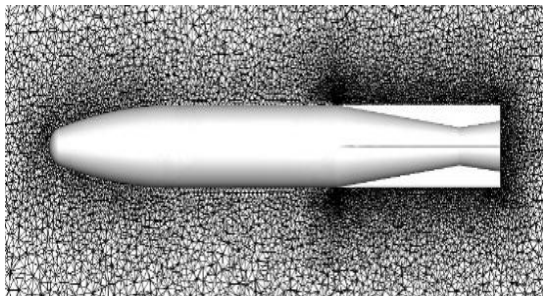


图 2 灵巧枪弹周围计算网格

2 数值模拟方法

2.1 控制方程和离散方法

相比于 Euler 方程，N-S 方程考虑了流动的黏性特性，使之更符合真实流动。而采用雷诺平均的 N-S 方程 (RANS)，在保证流动真实性的同时，还能有效降低耗资、缩短周期。笔者采用守恒 RANS 方程作为控制方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} \mathbf{W} dV + \oint_{\partial\Omega(t)} (F(\mathbf{W}) - \dot{\mathbf{x}}n\mathbf{W}) dS = \oint_{\partial\Omega(t)} F_v dS. \quad (1)$$

式中： \mathbf{W} 为守恒向量； Ω 为控制体； $\partial\Omega$ 为运动变形控制面； $F(\mathbf{W})$ 和 F_v 分别为对流和黏性通量； $\dot{\mathbf{x}}$ 和 \mathbf{n} 分别为控制面速度和法向矢量。

笔者对流场控制方程和湍流模型分别进行离散求解，采用显式格式求解压力-速度耦合方程，以及 1 阶迎风格式离散湍流模型。对于控制方程首先采用 1 阶迎风格式离散，待稳定后再采用 2 阶迎风格式，从而加速收敛。

2.2 湍流模型

湍流模型的选取对于准确模拟定常复杂流动至关重要，笔者采用 FLUENT 提供的 Spalart-Allmaras 模型。该湍流模型对于解决旋涡黏性是相对简单的方程，具有较好的鲁棒性，现已广泛应用于航空领域。Spalart-Allmaras 模型输运方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \tilde{\nu} u_i) &= G_\nu + \\ \frac{1}{\sigma_\nu} \left[-\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + G_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] &- Y_\nu + S_\nu. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\tilde{\nu}$ 、 G_ν 、 Y_ν 和 S_ν 分别表示湍流运动黏度、湍流黏度增加项、湍流黏度减少项和源项。

3 算例验证

笔者以国外 5.56 mm M193 枪弹为基础对数值模拟方法进行算例验证。计算网格如图 3 所示。选取 3 个马赫数及 2 个攻角下的不同工况来对枪弹气动参数进行仿真。图 4—6 为 5.56 mm 枪弹数值仿真结果与实验结果对比图。

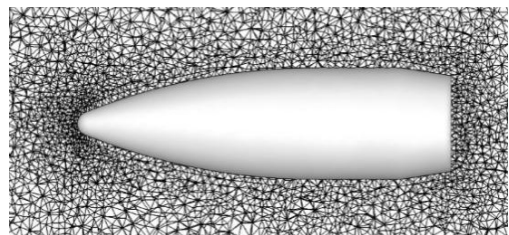


图 3 国外 5.56 mm M193 枪弹周围计算网格

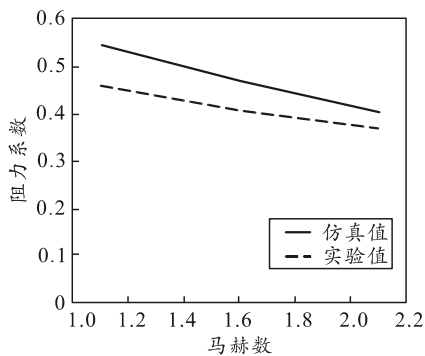


图 4 阻力系数对比

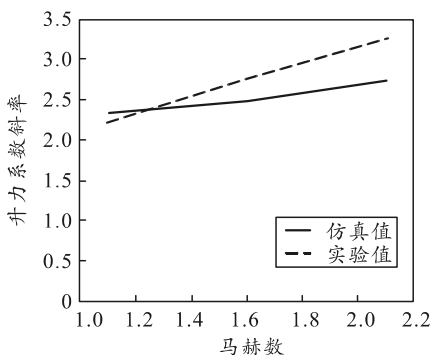


图 5 阻力系数斜率对比

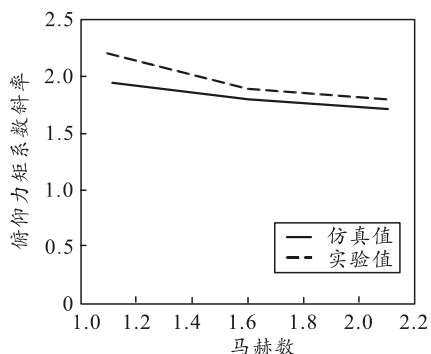


图 6 俯仰力矩系数斜率对比

结果表明：与文献[12]中的实验数据相比，升力仿真数值偏大，阻力及俯仰力矩仿真数值偏小。仿真值同实验值误差未超过 10%，满足误差要求，且变化趋势与文献中基本一致，证明该数值仿真方法的准确性。

4 枪弹气动特性研究

4.1 基准弹形气动特性

图 7—9 为枪弹基准弹形气动参数随马赫数变化曲线，其中升力系数与俯仰力矩系数是攻角为 2° 时的数值。由图可以看出：枪弹阻力系数随马赫数增大先增大后略微减小，升力系数随马赫数增大而增大，俯仰力矩系数随马赫数增大先增大后减小。

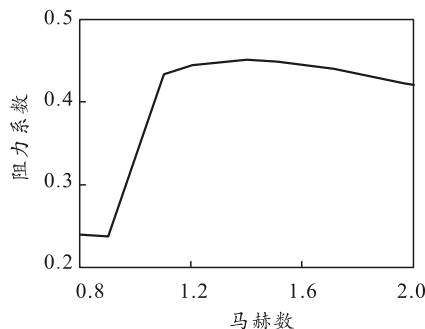


图 7 阻力系数随马赫数变化曲线

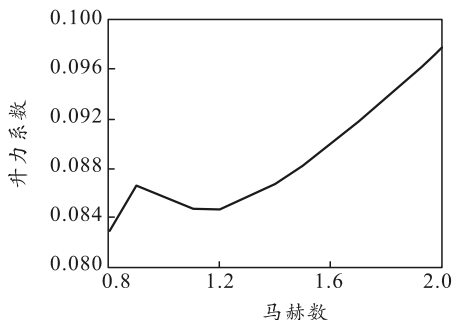


图 8 升力系数随马赫数变化曲线

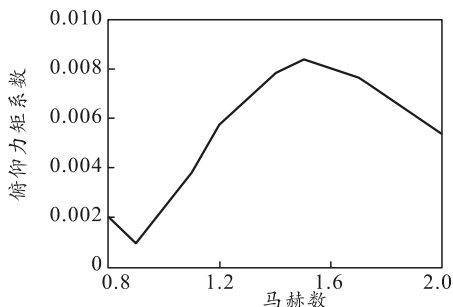


图 9 俯仰力矩系数随马赫数变化曲线

图 10—12 为枪弹基准弹形气动参数随攻角变化曲线。由图可以看出：枪弹阻力系数随攻角增大而迅速增加，升力系数随攻角增大而增大，且近似成线性关系，俯仰力矩系数随攻角增大先增大后减小。总的来说，该灵巧枪弹气动特性同普通枪弹的相类似，不同的是由于弹尾特殊结构，阻力系数及升力系数偏大，纵向静稳定性较高。

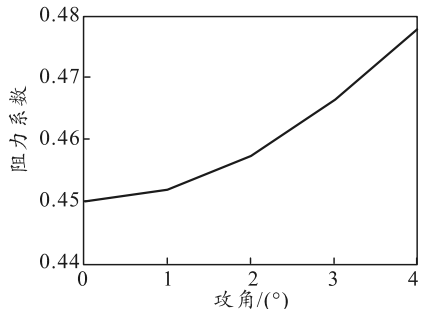


图 10 阻力系数随攻角变化曲线

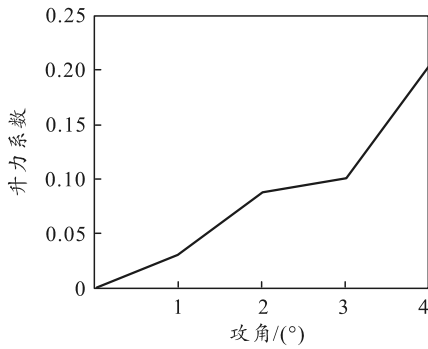


图 11 升力系数随攻角变化曲线

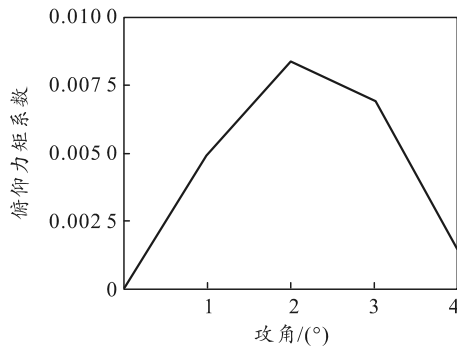


图 12 俯仰力矩随攻角变化曲线

4.2 弹尖半径对气动特性影响

为研究弹尖半径对气动特性的影响，笔者在基准弹形基础上保持枪弹总长及尾部总长不变，改变弹尖半径得到 3 种新弹形。计算分析 $Ma=1.5$ 时，各弹形气动参数及周围流场变化。表 1 为灵巧枪弹在不同弹尖半径下的气动参数计算结果。由表可见：随着弹尖半径的增大，枪弹阻力系数增大，升力系数先增大后减小，俯仰力矩系数先减小后增大，但各气动参数随弹尖半径的变化幅度较小。

表 1 不同弹尖半径下气动参数

弹尖半径/ mm	阻力系数	升力系数 ($\alpha=2^\circ$)	俯仰力矩系数 ($\alpha=2^\circ$)
3.0	0.449 908	0.088 107 0	0.008 385 19
3.5	0.451 925	0.088 260 9	0.008 363 18
4.0	0.455 253	0.088 883 2	0.007 865 13
4.5	0.457 137	0.088 852 2	0.008 136 07

图 13 为 $Ma=1.5$ 、 $\alpha=2^\circ$ 时 4 种弹形全弹上下表面压力分布曲线。由图可知，枪弹弹尖半径的变化对枪弹表面压力分布影响甚小。弹尖半径的增加仅略微增加了弹头表面的压强，对圆柱部及弹尾表面的压力分布几乎没有影响。枪弹各气动参数的变化基本上是弹头表面压力分布变化的结果。随着弹尖半径的增加，弹头逐渐变钝，其阻力系数自然逐渐变大。枪弹的升力及俯仰力矩主要由弹头和弹尾提供，而弹尖只占弹头很小一部分；因此，弹尖半径变化对升力及俯仰力矩系数影响甚微。

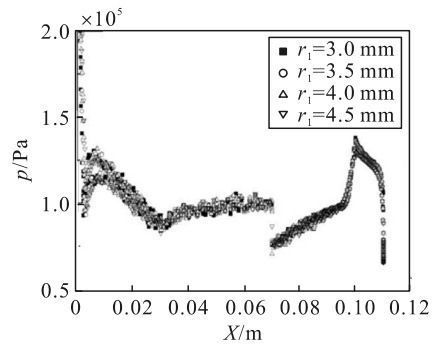


图 13 全弹上下表面压力分布曲线

4.3 圆弧部半径对气动特性影响

为研究圆弧部半径对气动特性的影响，笔者在基准弹形的基础上改变圆弧部半径，得到 3 种新弹形。表 2 为灵巧枪弹在不同圆弧部半径下的气动参数计算结果。由表可见：随着圆弧部半径的增大，枪弹阻力系数增大，升力系数减小，俯仰力矩系数增大，纵向静稳定性减小。

表 2 不同圆弧部半径下气动参数

圆弧部半径/ mm	阻力系数	升力系数 ($\alpha=2^\circ$)	俯仰力矩系数 ($\alpha=2^\circ$)
88	0.425 660	0.091 364 7	0.006 934 36
98	0.434 895	0.089 546 9	0.007 805 10
108	0.449 908	0.088 107 0	0.008 385 19
118	0.468 102	0.087 768 1	0.008 482 09

图 14 为 $Ma=1.5$ 、 $\alpha=2^\circ$ 时 4 种弹形表面压力分布曲线。由图可知，枪弹圆弧部半径的变化对枪弹表面压力分布影响较大。枪弹圆弧部半径的增加明显增加了弹头表面的压强，但对圆柱部及弹尾表面的压力分布几乎没有影响。枪弹各气动参数的变化基本上是弹头表面压力分布变化的结果。随着圆弧部半径的增加，弹头逐渐变钝，其阻力系数自然逐渐变大。圆弧部半径增加的同时，圆弧部长度减小、坡度变缓；因此，当存在攻角时，弹头提供的升力减小，纵向静稳定性减小。

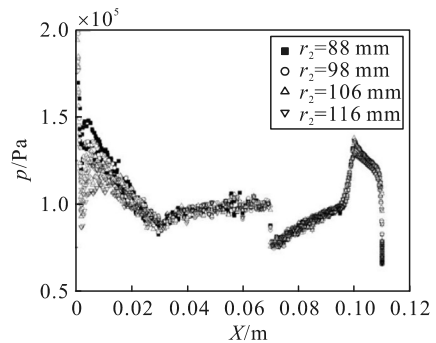


图 14 全弹上下表面压力分布曲线

4.4 交界处半径对气动特性影响

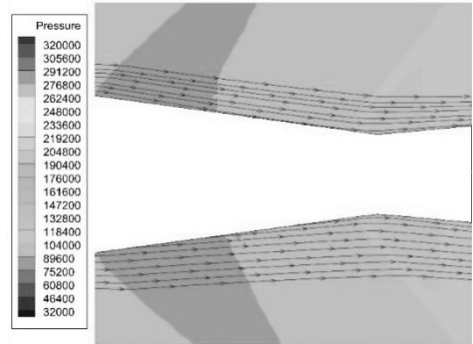
为研究交界处半径对气动特性的影响，笔者在

基准弹形的基础上改变交界处半径得到 3 种新弹形。表 3 为灵巧枪弹在不同交界处半径下的气动参数计算结果。由表可见：随着交界处半径的增加，枪弹阻力系数减小，升力系数减小，俯仰力矩系数增大，静稳定性减小。

表 3 不同交界处半径下气动参数

交界处半径/ mm	阻力系数	升力系数 ($\alpha=2^\circ$)	俯仰力矩系数 ($\alpha=2^\circ$)
2.4	0.484 855	0.094 123 6	0.004 467 93
2.7	0.468 304	0.090 754 1	0.006 565 61
3.0	0.449 908	0.088 107 0	0.008 385 19
3.3	0.433 477	0.087 954 7	0.009 071 00

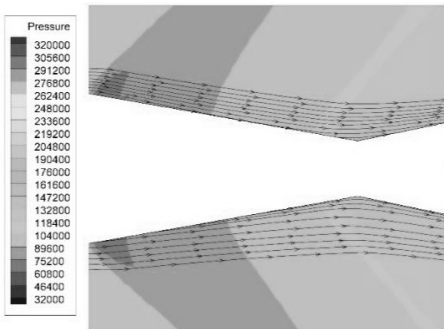
图 15 为 $Ma=1.5$ 、 $\alpha=2^\circ$ 时 4 种弹形尾部截面压力云图和流线图。由图可以看到：随着交界处半径的增加，收缩段表面压力逐渐增大，扩张段表面压力逐渐减小，使得枪弹阻力减小；随着交界处半径的增大，交界处的流动并无多大区别，流动的分离与再附现象也并不明显。这是因为弹尾收缩段长度较长、坡度较缓，流动难以实现分离的缘故。



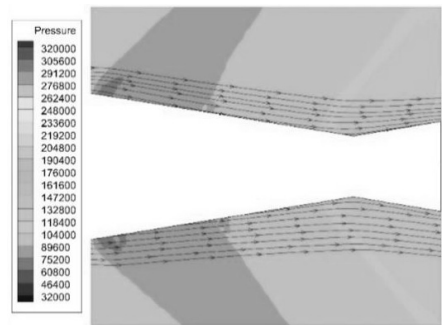
(d) 半径为 3.3 mm

图 15 枪弹尾部截面压力云图和流线图

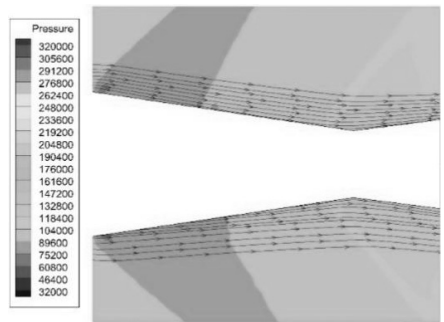
图 16 为 $Ma=1.5$ 、 $\alpha=2^\circ$ 时 4 种弹形底面压力云图。由图可以看到：随着交界处半径的增加，弹底压力分布逐渐增大，使得枪弹阻力减小。弹底中心为压强最大处，沿径向向外压强逐渐减小，当达到一定值后又逐渐回升。这是因为在弹底有涡产生，图中的低压区即为涡产生的位置。随着交界处半径的增加，弹底涡强减小，涡在弹底表面产生的流速减小，弹底表面压强增大。



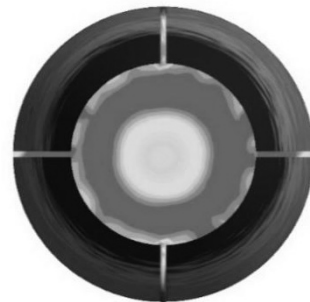
(a) 半径为 2.4 mm



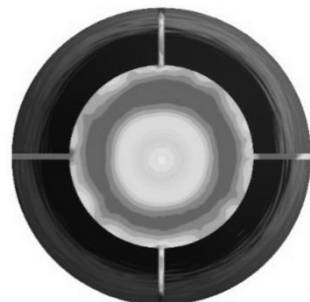
(b) 半径为 2.7 mm



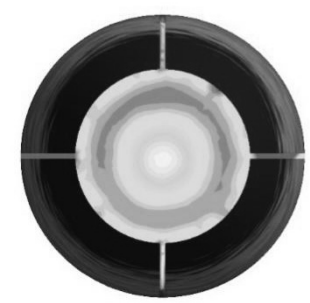
(c) 半径为 3.0 mm



(a) 半径为 2.4 mm



(b) 半径为 2.7 mm



(c) 半径为 3.0 mm



(d) 半径为 3.3 mm

图 16 枪弹底面压力云图

5 结论

笔者以某灵巧枪弹弹形为基础,通过改变其气动外形来研究外形变化对枪弹气动特性的影响。采用数值仿真方法研究了灵巧枪弹基准弹形的气动特性,并分析了外形尺寸变化对枪弹气动特性的影响规律。结论如下:

1) 灵巧枪弹基准弹形气动特性与普通枪弹相似,其阻力系数、升力系数均高于普通枪弹,纵向静稳定性也优于普通枪弹。

2) 随着弹尖半径的增加,枪弹阻力系数逐渐增大,升力及俯仰力矩系数的变化并不明显。

3) 随着圆弧部半径的增加,枪弹阻力系数增大,升力系数减小,俯仰力矩系数增大,枪弹纵向静稳定性减弱。

4) 随着交界处半径的增加,枪弹阻力系数减小,升力系数减小,俯仰力矩系数增大,枪弹纵向静稳定性减弱。

参考文献:

- [1] 刘延友. 某制导枪弹结构设计及其气动特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [2] 高原, 谷良贤, 潘雷. 偏转弹头导弹控制系统设计与仿真[J]. 飞行力学, 2009, 27(4): 66-69, 84.
- [3] 高昕欣. 偏头控气动特性研究[C]//中国航空学会. 杭州: 航空飞行器发展与空气动力学研讨会, 2006: 95-99.
- [4] BARRETT R. Invention and evaluation of the barrel-launched adaptive munition(BLAM)[R]. Eglin AFB, FL, US: Wright Laboratory, 1995.
- [5] JONES J F, KAST B A, KNISKERN M W, et al. Small caliber guided projectile: US, US 7781709 B1[P]. 2010-08-24.
- [6] 刘跃, 管小荣, 徐诚, 等. 枪弹外形对阻力特性影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(5): 133-137.
- [7] 王堃, 买瑞敏, 周俊祥. 基于 CFD 软件的制导兵器气动特性[J]. 兵工自动化, 2011, 30(5): 89-91, 96.
- [8] 郭向向, 曹红松, 宋旭辉, 等. 鸭式布局大翼面火箭弹气动特性研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 93-96.
- [9] SAHU J, HEAVEY K. PARALLEL CFD computations of projectile aerodynamics with a flow control mechanism[J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 678-687.
- [10] 吴志林, 袁钰. 尾翼式修正枪弹气动力计算研究[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(2): 127-130.
- [11] 王飞, 王志军, 吴国东, 等. 基于智能材料的弹箭增程数值仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2004 (S8): 325-327.
- [12] WEINACHT P. Validation and Prediction of the Effect of Rifling on the Performance of Small-Caliber Ammunition[C]//23RD International Symposium On Ballistics Tarragona, 2008: 775-782.