

# 某35 mm超音速榴弹弹丸阻力系数分析

张熠,周克栋,赫雷

(南京理工大学机械工程学院,南京210094)

**摘要:**根据弹丸设计理论,通过改变弹丸弧形部曲线、弧形部长度和弹丸长径比,以SolidWorks为平台建立了某35mm超音速榴弹弹丸的七种简化三维模型,导入Gambit中进行网格划分,运用工程流体软件Fluent进行了弹丸外流场数值仿真,得到不同外形轮廓尺寸的弹丸在不同马赫数下飞行时的阻力系数以及弹丸弧形部曲线、弧形部长度和弹丸长径比对弹丸阻力系数的影响规律。

**关键词:**超音速;35 mm;榴弹弹丸;Fluent;阻力系数

**本文引用格式:**张熠,周克栋,赫雷.某35 mm超音速榴弹弹丸阻力系数分析[J].兵器装备工程学报,2017(11):59-64,72.

**Citation format:**ZHANG Yi, ZHOU Kedong, HE Lei. Coefficient of Drag Analysis of a 35mm Supersonic Grenade Projectile [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017(11):59-64,72.

中图分类号:TJ411. +7

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)11-0059-06

## Coefficient of Drag Analysis of a 35mm Supersonic Grenade Projectile

ZHANG Yi, ZHOU Kedong, HE Lei

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

**Abstract:** For the study and design of 35 mm supersonic grenade, it is needed to study the coefficient of drag of grenade projectile during supersonic flight. According to projectile design theory, by changing the curve of the arc section, the length of the arc and the ratio of length to the diameter of the projectile, the simplified 3D models of seven kinds of 35 mm grenade projectile were established through SolidWorks. And the grid division was conducted by Gambit. The external flow simulation of grenade projectile was carried out by Fluent. The coefficients of drag of the studied projectiles with different shapes and dimensions under different Mach numbers, and the influence of the curve of arc section, the length of arc section and the ratio of length to diameter of projectile upon the drag coefficient of projectile were obtained. The research results provided a theoretical basis for the research and design of 35 mm caliber supersonic grenade.

**Key words:** supersonic; 35 mm; grenade projectile; Fluent; coefficient of drag

弹丸形状和尺寸的变化对弹丸的气动力特性、飞行稳定性、弹道性能以及射击精度都有不同程度的影响<sup>[1]</sup>。沈思颖等<sup>[2]</sup>研究了5.8 mm小口径枪弹流场特性,得出弧形部尺寸对阻力和升力系数影响较大,尾锥尺寸对气动系数的影响较小的结论。本文不考虑尾锥尺寸的影响,设为定值。陈文超等<sup>[3]</sup>对旋转体弹丸气体动力学计算和气动外弹道优化进行了研究,精选出一套可用于弹箭全弹道气动性能工程估算的

方法。马杰等<sup>[4]</sup>对高速旋转条件下的弹丸进行气动特性研究,提出并验证了适用于小攻角、超声速条件下马格努斯力及力矩系数的经验公式。姜波,齐杏林等<sup>[5]</sup>研究了不同攻角、不同马赫数的弹丸外流场,得出可利用外流场参数随弹道位置变化规律作为引信解除保险信息或弹道修正信息的结论。

在现有的研究成果中,对于35 mm榴弹超音速飞行时阻

收稿日期:2017-07-19;修回日期:2017-08-15

作者简介:张熠(1992—),男,硕士研究生,主要从事火炮、自动武器与弹药工程研究。

通讯作者:周克栋(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事武器系统与运用工程研究。

力系数的研究较少。考虑到 35 mm 弹药与小口径弹药的差异性,在设计 35 mm 超音速榴弹弹丸时应认真分析某些参数对弹丸超音速飞行时阻力系数的影响。本文对弹丸外形轮廓母线形状、弧形部长度和长径比这三个参数对弹丸超音速飞行时阻力系数的影响进行定量分析。

## 1 建立仿真模型

弹丸气动特性分析主要过程为:首先使用三维软件建模,然后导入 Fluent 前处理模块 Gambit 并建立计算域,对计算域进行网格划分;设置边界条件;最后利用 ANSYS/Fluent 求解器迭代计算求解。

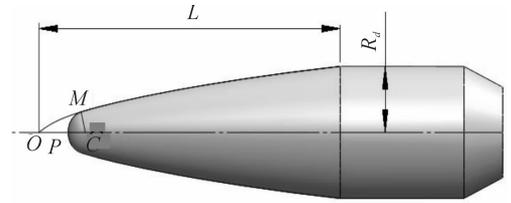
### 1.1 利用 SolidWorks 建立弹丸三维模型

根据文献<sup>[6]</sup>,合理地选择弹丸的外形参数范围并根据单一变量法原则,对所设计弹丸模型进行分组,共分为 7 组,14 种弹形。为保证研究分析的科学性,根据单一变量法,分别将外形轮廓母线形式设计为冯·卡门曲线、圆弧、直线,弧形部长度为 2.6D,长径比为 4.1。表 1 为本文所研究的三组弹丸模型的外形轮廓和尺寸参数。其中 D 为榴弹口径尺寸,取值为 35 mm。

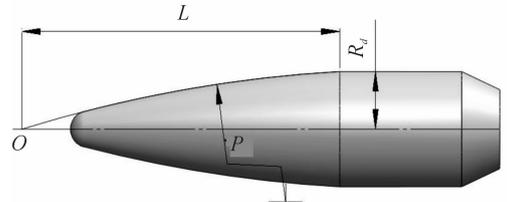
表 1 三组弹丸模型的外形轮廓与尺寸

分析组	外形轮廓 母线形式	弧形部长 度/mm	长径比
变母线	冯·卡门	2.6D	4.1
	圆弧	2.6D	4.1
	直线	2.6D	4.1
变长径比	冯·卡门	2.0D	4.1
		2.6D	4.1
		3.2D	4.1
	圆弧	2.0D	4.1
		2.6D	4.1
		3.2D	4.1
变长径比	直线	2.0D	4.1
		2.6D	4.1
		3.2D	4.1
	冯·卡门	2.6D	3.5
		2.6D	4.1
		2.6D	4.7
变长径比	圆弧	2.6D	3.5
		2.6D	4.1
		2.6D	4.7
	直线	2.6D	3.5
		2.6D	4.1
		2.6D	4.7

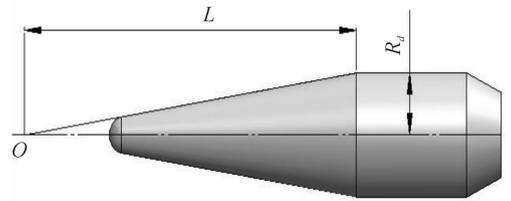
图 1 给出了 3 种不同母线形式的弹丸模型。为减少分析误差,模型其它外形轮廓和尺寸均设为定值,例如弹丸的弹尖、弹尾的外形尺寸。



(a) 母线为冯·卡门曲线的弹丸



(b) 母线为圆弧曲线的弹丸



(c) 母线为直线的弹丸

图 1 三种不同外形轮廓母线形式弹丸的三维模型

关于冯·卡门曲线, $L$ 为曲线段理论长度, $R_d$ 为曲线段最大半径,长度单位均为 mm。

定义中间量  $\theta$ :

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{2x}{L}\right) \quad (1)$$

则冯·卡门曲线方程为:

$$r_v(\theta) = \frac{R_d}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\theta - \frac{\sin 2\theta}{2}} \quad (2)$$

式(2)中长度单位为 mm。

函数曲线如图 2 所示。从 O 点延伸到最右端的曲线即为冯·卡门曲线。图 2 中的 MP 曲线不是冯·卡门曲线的一部分。在冯·卡门曲线前段寻找一个切点  $M(M_x, M_y)$ ,做内切圆,圆心为 C,与 x 轴的交点为 P。MP 曲线和冯·卡门曲线共同构成榴弹的弹头部外形。

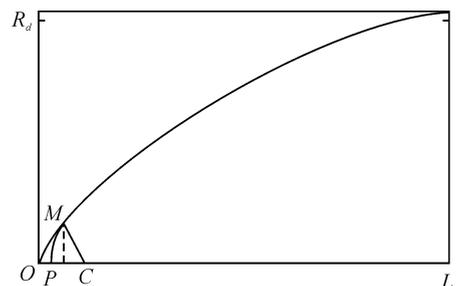


图 2 Matlab 绘制的冯·卡门和弹头部曲线

圆弧形母线方程为<sup>[7]</sup>:

$$r = \rho \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{L-x}{R_d} \right)^2} - 1 \right] + R_d \quad (3)$$

其中,  $L$  为曲线段理论长度,  $R_d$  为曲线段最大半径,  $\rho$  为圆弧形曲线的曲率半径, 长度单位均为 mm。

直线形母线方程如下:

$$r = \frac{R_d}{L} x \quad (4)$$

$L$  为曲线段理论长度,  $R_d$  为曲线段最大半径。

## 1.2 网格生成

采用 GAMBIT 软件生成弹丸表面网格和计算域网格。网格生成技术现在已经成为数值计算中一个重要的发展分支, 只有准确地模拟出真实物体的几何外形, 提供高品质的流场网格, 才能使计算结果精确。

由于弹丸外形简单, 可采用代数法生成计算网格<sup>[8]</sup>。代数生成法优点是直观、简单, 生成网格所需的机时很短, 可以很直观地控制网格的疏密与形状, 完全能够胜任本文所研究的问题。

以外形轮廓母线形式为冯·卡门曲线, 圆弧部长  $2.6D$ , 长径比为 4.1 的弹丸为例, 网格划分效果如图 3 所示。

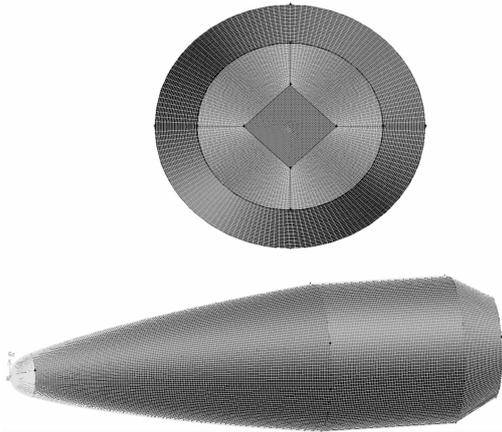


图 3 弹丸弹底网格(上)弹丸表面网格(下)

图 4 为整个计算域网格划分图(标注单位:mm)。整个计算区域是一个直径 400 mm, 长 1 200 mm 的大圆柱体。在大圆柱内部设一个直径 100 mm, 长 200 mm 的小圆柱体, 弹丸在小圆柱体中心位置。对小圆柱体以内的计算区域网格进行加密处理, 小圆柱外计算区域的网格划分稀疏, 这样既能保证计算精度, 又能减少计算量。整个区域网格数量约 150 万个。

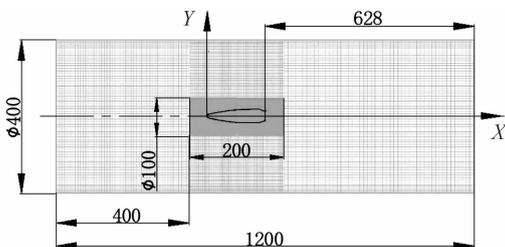


图 4 计算域网格

## 2 数值模拟方法

### 2.1 控制方程

本文研究的 35 mm 超音速榴弹周围流场为超音速气流, 需考虑密度变化的影响, 作为可压缩流体处理<sup>[9]</sup>。计算采用三维可压流的雷诺平均 N-S 方程。

$$\int_{\Omega(t)} \frac{\partial W}{\partial t} d\Omega + \oint_{\partial\Omega(t)} F(W) dS = \oint_{\partial\Omega(t)} F_v dS \quad (5)$$

其中:  $\Omega$  为控制体 ( $m^3$ );  $S$  为控制边界 ( $m^2$ );  $W$  为守恒变量;  $F(W)$  为对流通量 ( $kg/(s^2 \cdot m)$ );  $F_v$  为粘性通量 ( $kg/(s^2 \cdot m)$ )。

### 2.2 求解方法和边界条件

湍流模型选择 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型, 采用能量方程<sup>[10]</sup>。设置流体材料为空气, 密度为理想气体密度。采用 Sutherland 粘度, Sutherland 定律非常适合高速可压缩流动。壁面附近区域采用增强型壁面。对于高速可压缩理想气体, 选用密度基有限体积、二阶迎风格式的离散方法、三系数确定 Sutherland 公式计算黏性。对流通量采用 Roe-FDS 通量差分方法计算<sup>[11]</sup>。

### 2.3 边界条件

无限远处采用压力远场边界条件, 弹体采用固定壁面边界。

## 3 仿真结果与分析

表 2 为 Fluent 仿真得到的不同外形轮廓尺寸弹丸在不同马赫数下的阻力系数。  $D$  取 35 mm。

本文建立七组弹丸模型, 分别研究弹丸外形轮廓母线形状、弧形部长度、弹丸长径比这三个变量对弹丸阻力系数的影响。分别对马赫数为 1.2、1.6、2.0 时, 零攻角情况下弹丸的外流场进行仿真, 求得外形轮廓母线形状、弧形部长和长径比这三个参数对弹丸阻力系数的影响程度。

### 3.1 外形轮廓母线形式变化的影响

图 5 给出了长径比为 4.1、外形轮廓弧形部长度为  $2.6D$  ( $D=35$  mm), 不同母线形式的榴弹弹丸在零攻角情况下, 弹丸阻力系数随马赫数变化的仿真结果。

从图 5 可以看出, 在相同马赫数和攻角的条件下, 冯·卡门曲线外形轮廓母线弹丸的气动阻力系数最小, 圆弧形次之, 直线形最大。圆弧形外形轮廓母线弹丸和冯·卡门曲线外形轮廓母线弹丸的阻力系数差距不大, 直线形外形轮廓母线弹丸气动阻力系数与其他外形轮廓母线弹丸相比增幅明显。

在马赫数增大的情况下, 弹丸的气动阻力系数呈减小趋势。圆弧和冯·卡门曲线外形轮廓母线弹丸阻力系数减小的趋势较大, 直线形外形轮廓母线弹丸在马赫数大于 1.6 后, 阻力系数的减小趋势变小。

表2 弹丸气动特性参数仿真结果

阻力系数	分析组	外形轮廓 母线形式	弧形部长/ mm	长径比	Ma			
					1.2	1.6	2.0	
$C_d$	变母线	冯·卡门	2.6D	4.1	0.600 82	0.463 63	0.388 80	
		圆弧	2.6D	4.1	0.609 14	0.468 87	0.396 26	
		直线	2.6D	4.1	0.646 06	0.495 94	0.47035	
	变弧 形部 长度	冯·卡门		2.0D	4.1	0.650 69	0.513 50	0.429 33
				2.6D	4.1	0.600 82	0.463 63	0.38 88
				3.2D	4.1	0.583 72	0.453 95	0.373 73
		圆弧		2.0D	4.1	0.661 99	0.519 12	0.437 93
				2.6D	4.1	0.609 14	0.468 87	0.396 26
				3.2D	4.1	0.587 60	0.456 29	0.381 60
		直线		2.0D	4.1	0.699 51	0.548 25	0.516 02
				2.6D	4.1	0.646 06	0.495 94	0.470 35
				3.2D	4.1	0.624 55	0.484 26	0.456 93
	变长 径比	冯·卡门		2.6D	3.5	0.604 71	0.482 75	0.390 43
				2.6D	4.1	0.600 82	0.463 63	0.38 88
				2.6D	4.7	0.602 28	0.482 42	0.398 63
		圆弧		2.6D	3.5	0.614 05	0.489 13	0.398 24
				2.6D	4.1	0.609 14	0.468 87	0.396 26
				2.6D	4.7	0.610 71	0.488 18	0.409 73
直线			2.6D	3.5	0.653 91	0.521 61	0.473 93	
			2.6D	4.1	0.646 06	0.495 94	0.470 35	
			2.6D	4.7	0.650 21	0.519 92	0.493 91	

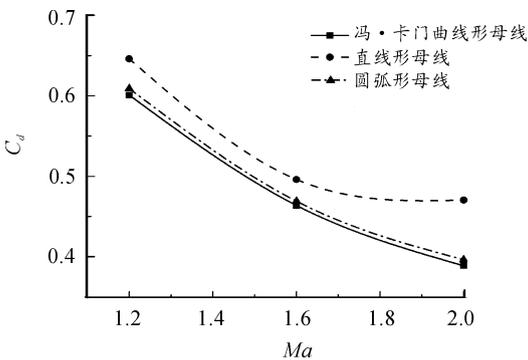


图5 不同母线形式弹丸阻力系数随马赫数变化的曲线

为更加直观了解弹丸在飞行过程中弹体附近的流场,图6为零攻角,马赫数为1.6时三种不同外形轮廓母线形式弹丸的剖面压力云图。

从图6可以看出,弹体所受压力以弹头部最大,弹丸圆柱部压力最小。直线形外形轮廓母线弹丸气动特性最差,激波角最大,激波面最宽,对空气的扰动最强,消耗动能最多,阻力系数最大。圆弧形外形轮廓母线弹丸在弧形部形成的激波角比冯·卡门曲线形外形轮廓母线弹丸弧形部形成的

激波压差略大,故阻力系数比冯·卡门曲线形外形轮廓母线弹丸的阻力系数略大。

由此可得出:在其他参数保持相同的情况下,冯·卡门外形轮廓曲线形母线弹丸的阻力系数最小。

### 3.2 弧形部长度变化的影响

图7分别给出了长径比为4.1的冯·卡门曲线形外形轮廓母线、圆弧形外形轮廓母线、直线形外形轮廓母线弹丸在不同马赫数下,气动阻力系数随弧形部长度变化的仿真结果。

在弹长和外形轮廓母线形式确定的情况下,弧形部长度的变化引起弹丸阻力系数的变化。由图7可以看出,弧形部长度越长,阻力系数越小。在弧形部长度增加到一定程度后,再增加弧形部长度,阻力系数的变化很小。弧形部长径比从2.6增加到3.2时,弹丸的阻力系数变化很小。随着弹丸飞行速度的提高,弹丸的阻力系数变小。

为更加直观了解弹丸在飞行过程中弹体附近的流场,图8给出了冯·卡门曲线形外形轮廓母线三种不同弧形部长度的弹丸在零攻角、1.6马赫数下的弹丸剖面压力云图。

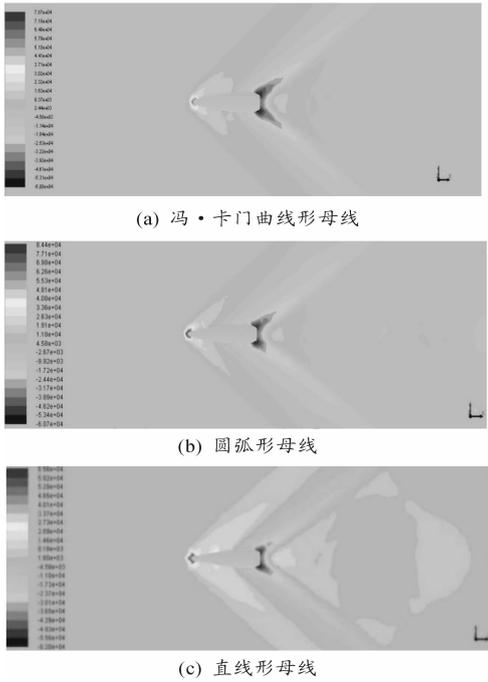


图6 三种不同母线形式弹丸在0攻角、1.6马赫数下的弹丸剖面压力云图

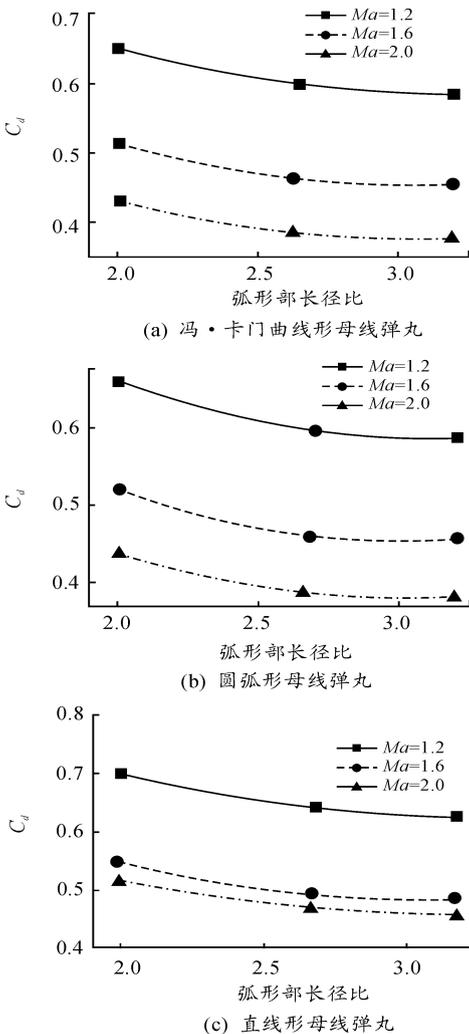


图7 弹丸阻力系数随弧形部长度变化的曲线

弧形部长度为 $2.0D$ 的弹丸弧形部产生的激波角最大,激波面最长,消耗动能最多,阻力系数最大。弧形部长度为 $2.6D$ 的弹丸随着弧形部的增长,弧形部形成的激波越往后越弯曲,激波角变小,且激波面压力小,故激波阻力小。弧形部长度为 $3.2D$ 的弹丸弧形部形成的激波面的长度比弧形部长度为 $2.6D$ 的弹丸弧形部形成的激波面的长度小,但是激波宽度比弧形部长度为 $2.6D$ 的激波宽度要宽,因此弹丸阻力系数减小的趋势减缓。

由图8所示的压力云图可知:在一定范围内增加弧形部的长度可以减小弹丸阻力系数。

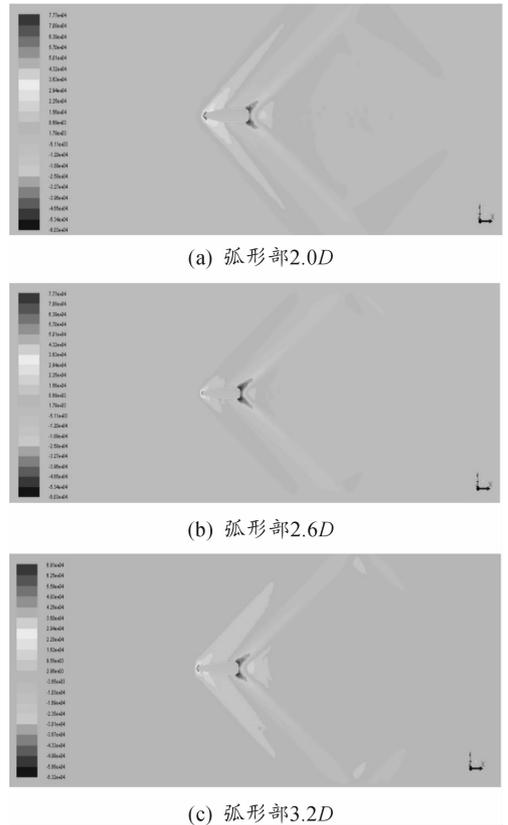


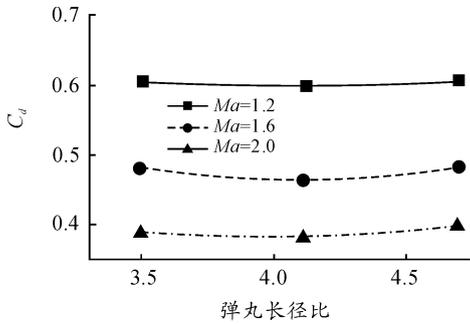
图8 三种不同弧形部长度的弹丸在0攻角、1.6马赫数下的弹丸剖面压力云图

### 3.3 弹丸长径比变化的影响

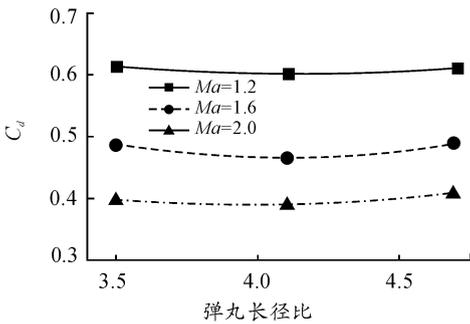
图9分别给出了弧形部长度为 $2.6D$ 的冯·卡门曲线外形轮廓母线、圆弧形外形轮廓母线、直线形外形轮廓母线弹丸在不同马赫数下,气动阻力系数随不同弹径比变化的仿真结果。

在弹丸弧形部曲线及长度确定的情况下,弹径比的变化其实就是指圆柱部位长度的变化。由图9可知,弹丸的气动阻力系数并不是随长径比的增大而单调递减。图9中弹丸阻力系数曲线的趋势为先随弹径比的增大微弱减小,当弹径比增大到一定程度后,弹丸阻力系数随着弹径比的增大而增大。在马赫数为1.6和2.0时,长径比4.7的弹丸阻力系数比长径比3.5的弹丸阻力系数大,说明在弹丸速度达到一定程度后,弹丸长径比增加,弹丸的阻力系数反而增大。

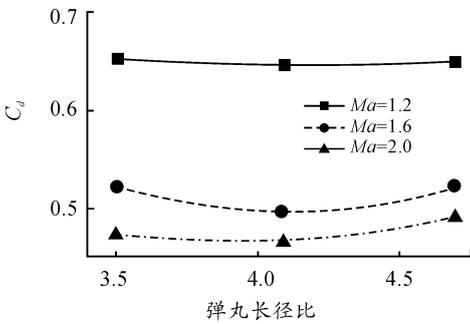
由图7和图8还可以得出:弹丸长径比对弹丸阻力系数的影响小于弹丸弧形部长度对弹丸阻力系数的影响。



(a) 冯·卡门曲线形母线弹丸



(b) 圆弧形母线弹丸



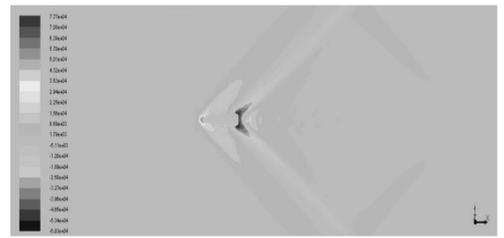
(c) 直线形母线弹丸

图9 弹丸阻力系数随长径比变化的曲线

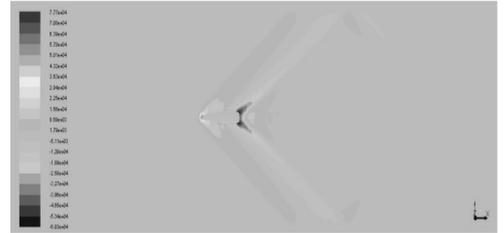
为更加直观了解弹丸在飞行过程中弹体附近的流场,图10给出了冯·卡门曲线形外形轮廓母线,三种不同弹径比的弹丸在零攻角、1.6马赫数下的弹丸剖面压力云图。

由图10所示压力云图可以看出,这三种弹形中,弹径比为4.1的弹丸弧形部产生的激波面最短。长径比为3.5和4.7的弹丸弧形部产生的激波面宽度较宽且长度长,故其阻力系数比长径比为4.1的弹丸大。当来流速度达到1.6马赫数时,长径比为4.7的弹丸圆柱部产生了与弹尾激波相连的附体激波层,因此当弹丸长径比达到4.7时,弹丸阻力系数反而比长径比为3.5时大。

由此可知:并非弹丸长度越长,弹丸阻力系数越小。弹丸长度的选择应根据弹丸的其他外形轮廓尺寸和设计需要合理匹配。



(a) 长径比为3.5



(b) 长径比为4.1



(c) 长径比为4.7

图10 三种不同弹径比的弹丸在0攻角、1.6马赫数下的弹丸剖面压力云图

## 4 结论

1) 在一定的范围内,弧形部长度越长,弹丸阻力系数越小。当弧形部长度达到一定程度后,增加弧形部的长度对减小弹丸阻力系数的作用很小;

2) 冯·卡门曲线形外形轮廓母线弹丸阻力系数最小,圆弧形次之,直线形最大;

3) 在合理的范围内增大弹丸长径比,可以减小弹丸飞行时的阻力系数。

## 参考文献:

- [1] 史继刚,易文俊,管军,等.基于粒子群-牛顿算法的弹丸阻力系数辨识[J].兵器装备工程学报,2017(2):23-26.
- [2] 沈思颖,陈川琳,吴志林.弹形变化对超音速下弹丸气动特性的影响[J].兵器装备工程学报,2016,37(4):15-19.

## 4 试验验证

为了检验仿真结果的正确性,通过一些试验数据对计算

结果进行验证,其中火炮弹丸初速实验值由线圈靶法测得(GJB 3196.31A—2005),最大膛压实验值由铜柱法测得(GJB 3196.27A—2005),双芳3发射装药的爆温由密闭爆发器测得(GJB 770B—2005),验证结果如表6。

表6 大口径加农炮弹道性能计算值与实验值对比

炮口弹丸初速 $v_0/(m \cdot s^{-1})$			最大膛压 $p_m/MPa$			火药爆温 $T_V/K$		
计算值	试验均值	试验误差/%	计算值	试验均值	相对误差/%	计算值	试验均值	相对误差/%
646.5	652.5	0.92	224.7	232.1	3.2	2 598.3	2 584	0.55

## 5 结论

与试验相比,编制的内弹道仿真程序计算结果准确,炮口弹丸初速、最大膛压和火药爆温相对误差均小于4%,仿真结果和实验吻合良好。

## 参考文献:

- [1] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:11-80.
- [2] 田桂军. 内膛烧蚀磨损及其对内弹道性能影响的研究[D]. 南京:南京理工大学,2003.

- [3] 华东工学院801教研室. 内弹道学[M]. 南京:华东工学院出版社,1986:109-110.
- [4] 欧阳青. 火炮身管烧蚀磨损与寿命问题研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [5] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014:68-73.
- [6] 华东工学院101教研室. 火药及装药设计[M]. 南京:华东工学院出版社,1986:10-28,107-108.
- [7] 王泽山,何卫东,徐复铭. 火炮发射装药设计原理与技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014:15-16.

(责任编辑 周江川)

(上接第64页)

- [3] 陈文超. 旋成体弹丸气动力计算与气动外弹道优化设计[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- [4] 马杰,陈志华,姜孝海. 高速旋转条件下的弹丸气动特性研究[J]. 弹道学报,2015,27(2):1-6.
- [5] 姜波,齐杏林,贾波,等. 基于fluent的弹丸外流场仿真计算[J]. 计算机仿真,2014,31(3):38-40.
- [6] 曹兵,郭悦,杜忠华. 弹药设计理论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2016.
- [7] 唐伟,江定武,桂业伟,等. 旋成体导弹头部母线线型的选择问题研究[J]. 空气动力学学报,2010,28(2):218-221.

- [8] 薛倩. 基于代数法的叶轮机叶片三维网格生成技术研究[J]. 计算机与数字工程,2015(7):1337-1339.
- [9] 沈晓军,王雨时,闻泉,等. 引信外形对超音速弹丸气动特性的影响仿真[J]. 火箭与制导学报,2016,36(2):128-130.
- [10] 吴志林,陶家宾. 基于FLUENT的微型修正弹药气动特性仿真[J]. 计算机仿真,2013,30(6):20-23.
- [11] 王晓鹏,李响,左英桃,等. 超音速空腔流动中旋成体气动特性数值研究[J]. 火箭与制导学报,2016,36(5):97-100.

(责任编辑 周江川)