

含侧喷流炮弹绕流场数值计算^{*}

吴小平 王建文 武晓松 耿光有

(南京理工大学机械学院, 南京, 210094)

摘 要: 利用迎风 TVD 格式, 在超音速下, 分别对无侧喷流和头部含侧喷流的炮弹绕流场进行数值模拟, 结果表明侧喷流能够降低炮弹表面的摩擦阻力, 对研究炮弹的增程技术有一定的参考价值。

主题词: TVD 格式⁺, 侧喷流⁺, 数值仿真

分类号: V235.113

THE NUMERICAL COMPUTATION FOR EXTERNAL FLOW FIELD OF ARTILLERY PROJECTILE WITH SIDE JET FLOW

Wu Xiaoping Wang Jianwen Wu Xiaosong Geng Guangyou

(School of Mechnies, Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: The behavior of jets in super-sonic flow field over a biconic body with jet interaction and no jet interaction were detailed numerical simulated using high resolution TVD scheme. The jet inter-action drag has been compared with no jet interaction. The computed results show that jet-inter-action decreased the surface drag of artillery projectiles. It is useful for the research of the range increasment of artillery projectiles.

Subject terms: TVD schemes⁺, Jets interaction⁺, Numerical simulation

1 引 言

以往炮弹增程技术是通过改善弹形、安装底排装置等办法来降低波阻, 提高弹底压力, 降低底阻; 新型的增程技术是通过在弹体头部表面安装侧喷装置。侧喷流场本身具有非常复杂的波系和涡系结构, 已成为当今流体界研究的热门课题之一。为了获得较清楚的流动规律, 本文利用高精度、高分辨率的 TVD 格式对侧喷流场和绕流场的相互影响进行了数值计算。

2 物理模型及控制方程

均布在弹丸周向的侧喷管, 如果数量较多, 则含侧喷流炮弹绕流场可认为二维轴对称流动问题。假设不考虑化学反应, 来流气体与侧喷气体为同质, 则该问题可用理想的、粘性的二维轴对称的 N-S 方程描述^[1]:

$$\frac{\partial U}{\partial T} + \frac{\partial F(U)}{\partial X} + \frac{\partial G(U)}{\partial Y} + \frac{\delta}{y} \cdot \frac{\partial H(U)}{\partial Y} = \frac{1}{Re} \cdot \left(\frac{\partial F_v(U)}{\partial X} + \frac{\partial G_v(U)}{\partial Y} + \frac{\delta}{y} \cdot \frac{\partial H_v(U)}{\partial Y} \right)$$

式中： $\delta=0$ 时表示非轴对称， $\delta=1$ 时表示轴对称。

3 数值方法及边界条件

3.1 方程的离散

采用有限体积法进行计算，即：

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \frac{\Delta T}{S_{i,j}} \cdot \oint_{i,j} \left(\left(\frac{F_v}{Re} - F \right) \cdot dy - \left(\frac{F_v}{Re} - G \right) \cdot dx + \frac{\Delta T \cdot \delta}{y} \cdot \left(\frac{H_v}{Re} - H \right) \right)_{i,j}$$

上述方程处理如下：

- (1) 无粘部分采用 TVD 格式进行离散^[2]；
- (2) 粘性部分则采用中心差分格式通过坐标变换进行离散；
- (3) 轴对称项则采用当地参数。

3.2 边界条件的处理

来流边界：由空气来流以及侧喷来流给出参数；远外场边界：采用一维特征线方法处理；出口边界：超音速出流按外推法处理。

固壁边界：(1) 无粘流采用^[2]中固壁压力计算方法，其余参量则按镜像反射条件给定；(2) 粘性流采用沿固壁法线方向动量守恒方程计算固壁压力，速度采用无滑移边界条件。

由于炮弹的外形较为复杂，而且其头部又存在侧喷流，因此采用了分区域进行数值计算，以利于程序的编制和调试。同时，以无粘流的计算结果作为粘性流的初场处理，从而达到加快计算的收敛速度。

4 数值结果及分析讨论

本文计算了没有侧喷装置的炮弹绕流场以及有侧喷装置的炮弹绕流场，计算条件见表1。以弹径和自由来流音速分别为特征长度和速度的计算雷诺数为 1.173×10^6 。

Table 1 The parameters of 155mm extended range projectile with nose jets

Air flow	H/m	M_∞	T/K	$\alpha/ (m/s)$	p/MPa
	11000	1.65	216.7	295	0.0227
Side jet flow (1)	$\alpha/ (^\circ)$	d/mm	T/K	Jet flow velocity (m/s)	p/MPa
	25°	5	1216	1900	0.4
Side jet flow (2)	$\alpha/ (^\circ)$	d/mm	T/K	Jet flow velocity (m/s)	p/MPa
	45°	5	1216	1900	0.4

图1给出了无侧喷沿弹体表面及延伸到下游远方的压力系数分布，压力系数^[3]定义为：

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot \alpha_\infty^2}$$

式中 ρ_∞ ， α_∞ ， p_∞ 分别表示来流密度、音速、来流压力，在计算中均取为标准大气参数， p 为当地静压。从图1可以看出越过弹头部后，压力迅速降低，流动呈加速状态。在弹体卵形部与圆柱部的结合处，压力迅速下降，这是弹表面的不连续造成的。在进入弹底后，压力迅速降

低, 形成底部低压区。随着向下游方向距离的增加, 压力逐渐恢复到自由来流值。

图2给出了含侧喷流沿弹体表面及延伸到下游远方的压力系数分布。从图中可以明显看出在炮弹的前半段压力系数没有改变, 也证明在超音速来流的条件下, 下游的扰动不可能向上游传播。随着侧喷流的加入, 在喷口的下游区, 由于低压区的形成, 炮弹后半部的压力系数迅速降低, 远离喷口又形成再附激波, 使压力系数有所回升。

图3为无侧喷流场的压力等值线。从图中看出在炮弹头部出现压缩激波, 在炮弹的卵形部和弹底部出现了膨胀波, 尾部出现驻点和再压缩激波, 这些计算结果与气体动力学理论分析相一致, 再一次说明 TVD 格式具有高清晰的激波分辨率。

图4给出了含侧喷流的压力等值线。图中在喷口前段出现高压区以及分离区, 在喷口的后段出现低压区以及再附激波。这与 Fournier, Jeffrey, Clark 和 Chan 等人的研究^[4,5]结论相一致。图5给出了在喷管下游的速度矢量图, 从图中可看出在喷管下游实际是一个回流区, 在区域内, 方向与空气来流方向相反, 根据弹体表面切向力计算公式 $\tau = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ 可知, 侧喷流降低了炮弹表面的摩擦阻力。因此, 炮弹头部的侧喷装置不仅提供了推力, 而且改变了炮弹的绕流场特性, 降低了表面摩阻, 达到了增程的效果。

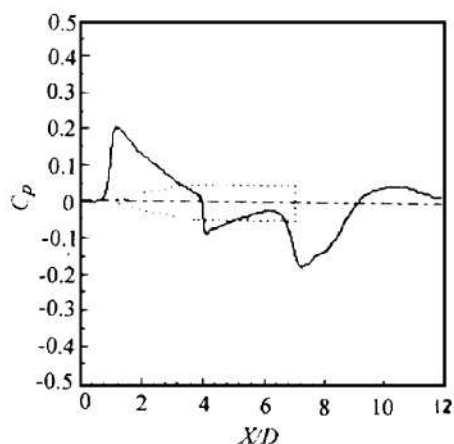


Fig. 1 Jet-off interaction line plots of computed pressure of artillery projectiles

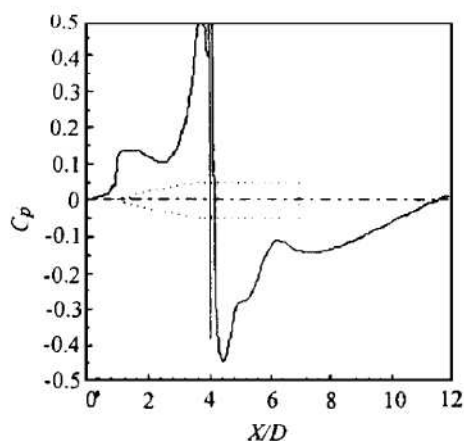


Fig. 2 Jet-on interaction line plots of computed pressure of artillery projectiles



Fig. 3 Jet-off interaction pressure contours

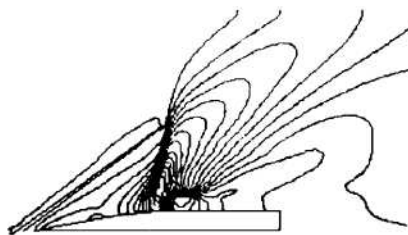


Fig. 4 Jet-on interaction pressure contours

从表2可得出, 在侧喷流条件下全弹表面摩擦阻力比没有侧喷流下的摩擦阻力要小, 负号表示力与空气来流的流动方向相反。因此侧喷流改善了弹体表面的气动特性, 在减小弹体摩擦阻力上起到了积极的作用。

Table 2 The comparison of drag of artillery projectiles between jet-on and jet-off interaction

Parameters	Jet-off	Jet-on(25°)	Jet-on(45°)
Integral of nose pressure (N)	500.856	597.395	618.623
Integral of surface tangential force(N)	11.575	-9.608	-10.143
Integral of base pressure (N)	322.232	318.760	321.801
All drag(N)	834.663	906.547	930.281

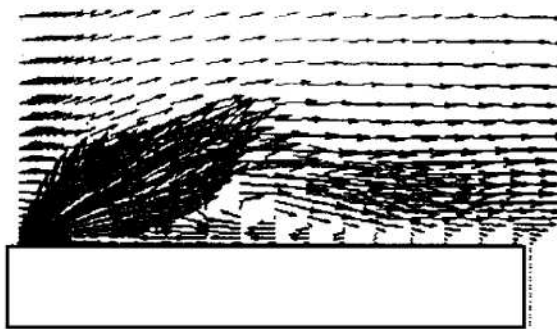


Fig. 5 The velocity vectors of jet-on interaction artillery projectiles downstream of jet exit

5 结 论

所采用的有限体积 TVD 格式适用于非正交网格的计算,能够处理较复杂的边界问题,能够可靠地模拟含侧喷流的弹丸绕流场,为研究侧喷流技术提供了有力的工具;含侧喷流的弹丸绕流场改善了绕流场特性,降低了弹体表面摩擦;此方法也可以推广到三维含侧喷流的绕场计算中去。

参 考 文 献

- 1 武晓松. 弹丸(含底部排气)绕流场的数值研究. 弹道学报, 1992 (3)
- 2 Wang J C T. Numerical simulation of blast field using a high resolution TVD finite volum scheme. AIAA 95-2151
- 3 马铁犹. 计算流体动力学. 北京: 北京航空学院出版社, 1986.
- 4 Fournier E Y, Jeffrey A J. Analysis of freestream-jet interaction with application to reaction—jet control on supersonic missile bodies using a Navier-Storks code. 15th International Symposium on Ballistics Jerusalem, Israel: 1995.
- 5 Clark S W, Chan S C. Numerical investigation of a transverse jet for supersonic aero-dynamic control. AIAA 92-0639