

空心弹的阻力特性与气动外形数值分析

黄振贵, 李艳玲, 陈志华, 郭玉洁
(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏南京 290014)

摘要: 为了得到具有最小阻力系数的空心弹外形, 基于雷诺平均方程以及二阶 AUSM 格式, 对不同空心弹气动外形的二维流场以及气动力进行了数值计算, 得到了不同外形条件下空心弹的内流场特性, 以及阻力系数变化曲线与最小阻力系数的空心弹气动外形。另外, 分别对具有最小阻力系数的空心弹与常规空心弹的超声速流场进行了数值模拟, 对比分析了二者流场结构的异同, 数值验证了具有最小阻力系数弹型的减阻效果, 可为相关研究提供参考。

关键词: 流体力学; 空心弹; 管式弹; 阻力系数; 流场

中图分类号: TJ011.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2013)05-0535-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.05.004

Numerical Investigations on the Drag and Aerodynamic Characteristics of a Hollow Projectile

HUANG Zhen-gui, LI Yan-ling, CHEN Zhi-hua, GUO Yu-jie

(Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: With the purpose of obtaining the minimum drag coefficient of a normal hollow projectile, based on RANS governing equations and 2nd-order AUSM scheme, the two-dimensional flow fields and aerodynamic forces of different shapes of hollow projectiles have been simulated numerically, both the external and internal flow features of hollow projectiles with different shapes are obtained, as well as the drag variation curves and the aerodynamic shape of the hollow projectile with the minimum drag coefficient. Moreover, the projectile with minimum drag coefficient and normal projectile with ultrasonic sound flow fields are simulated respectively, the flow characteristics of them are discussed and compared, and the minimum drag effect of the obtained projectile is validated, our numerical results can provide important guidance for relative investigations.

Key words: fluid mechanics; hollow projectile; tubular projectile; drag coefficient; flow field

0 引言

空心弹也称为管式弹, 主要是因为其飞行部分为中间空心的薄壁圆管。由于空心弹与传统的实心

弹在几何结构上有很大的区别, 所以它具有很多实心弹不具备的优点, 如阻力较小, 准确度与精度高, 对目标侵彻能力强, 成本低, 发射武器后坐力小, 勤务处理性能更好等。其中最主要的特点是空气阻力

收稿日期: 2012-06-11

基金项目: 瞬态物理国家重点实验室基金项目(9140C300205110C30)

作者简介: 黄振贵(1986—), 男, 博士研究生, E-mail: hzgui126@126.com;

陈志华(1967—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: chenzh@mail.njust.edu.cn

小,对目标的侵彻能力比实心弹强^[1-3]。

20世纪70年代西方国家广泛开展了空心弹研究^[4-8],包括应用开发研究并进行了可行性试验。对于空心弹口径,从5.56~105 mm均有涉及,而重点研究口径为7.62 mm的枪弹和口径为20 mm的炮弹。我国从20世纪70年代以来也开展了空心弹技术的研究,但大多数属于对国外研究结果的试验验证^[3,9-11]。

随着计算流体力学的迅速发展,常见空心弹流场的数值模拟已分别得到研究^[2,7-8,12-15],其数值模拟主要基于Euler方程^[2,7,12-13]。然而,由于空心弹的表面积约为对应实心弹的2倍,其摩擦阻力在总阻中所占的比例较常规弹摩擦阻力所占比例大,已不容忽视,所以最近的空心弹数值模拟研究均基于N-S方程^[8,14-15]。然而,究竟什么样的空心弹气动外形,其对应的阻力最小,或空心弹气动外形与其阻力系数的关系,目前暂没见相关公开报道。

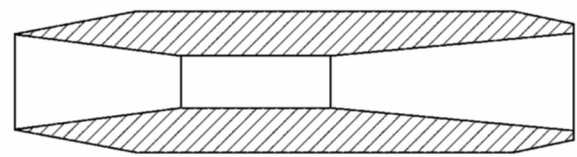
基于此,本文数值研究空心弹气动外形与其阻力的变化关系。在常规空心弹的基础上,通过改变其外形轮廓,数值模拟得到其相应阻力系数与外形变化的曲线,最终得到具有较小阻力系数的空心弹气动外形。由于本文通过大量的数值模拟来穷举空心弹气动外形与其阻力的变化规律,因此空心弹的三维流场模拟因对计算资源要求太高而不太可能实现,加上相关研究表明空心弹二维流场的阻力与三维流场呈现相同变化趋势,因此,本文选取空心弹二维轴对称流场为研究对象。

1 数值计算方法与模型

1.1 计算方法与验证

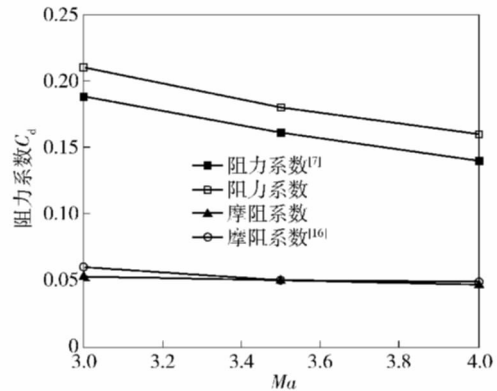
本文采用与文献[15]相同的控制方程与数值模拟方法。方程的对流项采用二阶AUSM格式,而粘性项采用中心差分格式,时间项则取二阶R-K格式。取空心弹初始与边界条件与文献[15]相同。具体细节参见文献[15]。

图1为常见空心弹模型以及相关数值模拟得到的阻力系数对比图。其中图1(a)为常见空心弹模型,而运用以上描述的数值方法所得到的阻力系数与文献[7]及文献[16]的经验公式计算结果比较如图1(b)所示。可知,不管是阻力系数还是摩擦阻力系数都基本相符。而由于文献[7]的计算是基于Euler方程,所以没有包括摩擦阻力系数,导致我们的阻力系数稍大,但与马赫数的变化趋势相同,这验证了本数值模拟计算方法的正确性。



(a) 常规空心弹模型

(a) Normal hollow projectile model



(b) 不同马赫数条件下阻力系数的比较

(b) Comparison of drag coefficient at different Ma number

图1 常见空心弹模型及其不同马赫数条件下的阻力系数与文献[7]和文献[16]的对比

Fig. 1 Normal hollow projectile model (a) and Comparison of drag coefficient at different Mach number with Ref. [7] and [16] (b)

1.2 数值模型

对于空心弹丸,常关注以下3个基本参数:内径 d ,外径 D 以及弹丸长度 L 。通过数值模拟发现,当弹外壁为部分圆柱时,其阻力系数较没有圆柱段高,因而本文空心弹模型的基本形状如图2所示。图中取 $D=30$ mm, $d=17.2$ mm, $L=80$ mm。为了取得具有最小阻力系数的空心弹数值模型,对弹丸各个壁面进行命名,空心弹丸的顶点记为 O 点,弹丸外壁面最高点记为 A 点,弹丸内壁面最低点记为 B 点。针对此模型,分别以空心弹前后两个斜楔的角度变化(以 OA 和 OB 水平距离 L_1 、 L_2 的变化来表示)来确定弹丸结构。

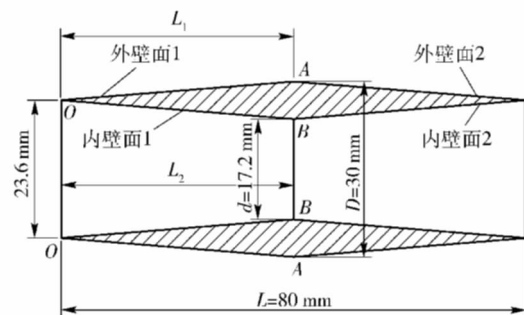


图2 基本模型

Fig. 2 Basic model for the hollow projectile

2 结果与讨论

2.1 空心弹外壁面形状对阻力的影响

首先仅对空心弹丸外壁面形状进行变化,而弹的其他参数则保持不变,以探讨弹阻力系数随 L_1 取值的变化趋势。另外,因弹是轴对称结构,可只取弹上半部分来讨论,因此我们以外壁面 1 和外壁面 2 上的压力变化趋势来代表整个外壁压力的变化趋势。计算时取来流马赫数 Ma 为 3。

图 3 分别为 L_1 取 30 mm、48 mm、70 mm 时流场的压力等值线图。可知,随着 L_1 值的增加,弹丸头部外壁面 1 上的最大压力值降低,而弹内腔的流场与 L_1 的变化无关,基本保持不变。因而,可认为外壁面 1 和 2 上的阻力随 L_1 的变化趋势与整个弹丸阻力系数变化相同。

表 1 为不同 L_1 取值时,弹外壁面压阻、摩阻及其合力的变化情况。可知, L_1 的变化对于摩擦阻力的影响较小,基本可以忽略,其主要影响压阻的大小,即弹丸阻力变化过程中压阻占主导地位。

表 1 弹外壁 1 和 2 阻力随 L_1 的变化

Tab. 1 Drag forces of the outer walls with different L_1

L_1 /mm	压阻/N	摩阻/N	总阻/N
10	24.193	3.350	27.543
30	8.288	3.758	12.046
48	6.996	3.767	10.763
70	8.965	3.802	12.767

然而,由表 1 知,总阻与 L_1 的变化关系不是简单的线性关系,存在一个极小值点。为了得到此点所对应的 L_1 值,可在以上 L_1 取值所得到的最小阻力点($L_1 = 48$ mm)附近,进一步降低其取值间隔来进行数值计算。取 L_1 分别为 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、42 mm、44 mm、46 mm、48 mm、49 mm、50 mm、51 mm、52 mm、54 mm、56 mm、58 mm、60 mm、70 mm,而相对应的阻力系数变化曲线如图 4 所示。可知,阻力系数随 L_1 的变化曲线为开口向上的抛物线形式,并在 $L_1 = 48$ mm 左右取最小值。因此,对于最小阻力系数的空心弹丸的外壁面形状设计,则可取 $L_1 = 48$ mm。

2.2 空心弹内壁面形状对阻力的影响

对于空心弹内壁面形状的设计,则可参照外壁面的数值设计方法。此时弹丸外壁面形状取上节得到的值,即 $L_1 = 48$ mm。而对内壁面,分别对 L_2 分别为 38 mm、45 mm、70 mm 时的空心弹进行模拟,其压

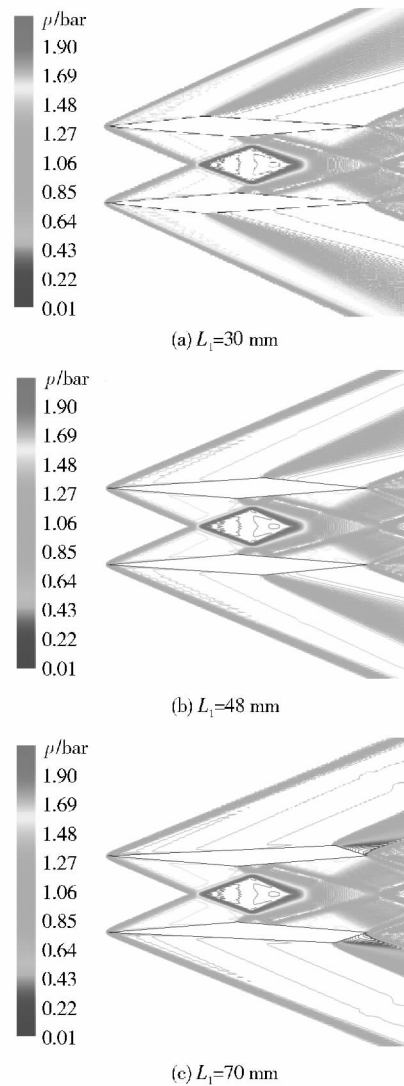


图 3 不同 L_1 值时压力等值线分布

Fig. 3 Distributions of the isobars at $L_1 = 30, 48, 70$ mm

力等值分布如图 5 所示。可知空心弹内腔因斜激波会与其内壁面相互作用而形成反射。在轴线上,各种激波也会相互碰撞形成折射和反射,因此其波系结构较外场复杂,并使空心弹内壁面压力分布较外壁面复杂。同样有如表 2 所示的随 L_2 变化的弹丸内壁面阻力。可知,内壁面阻力与 L_2 的变化仍不是简单线性关系,同样为开口向上的抛物线型。

表 2 弹体内壁 1 和 2 阻力随 L_2 的变化

Tab. 2 Drag forces on the inner walls varies with L_2

L_2 /mm	压阻/N	摩阻/N	总阻/N
20	5.579	4.232	9.811
38	1.616	4.208	5.824
45	1.838	4.145	5.983
70	8.637	4.023	12.660

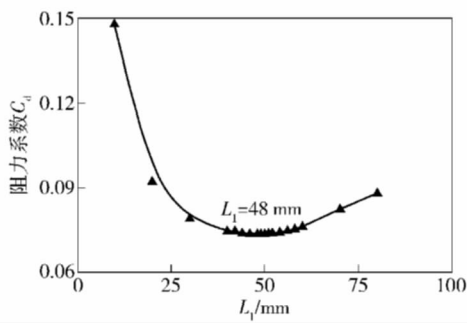


图 4 阻力系数随 L_1 的变化趋势

Fig. 4 Drag coefficient vs L_1

知 $L_2 = 38 \text{ mm}$ 左右时阻力系数取最小值。因此,对于最小阻力系数的空心弹丸的外壁面形状设计,则可取 $L_2 = 38 \text{ mm}$ 。

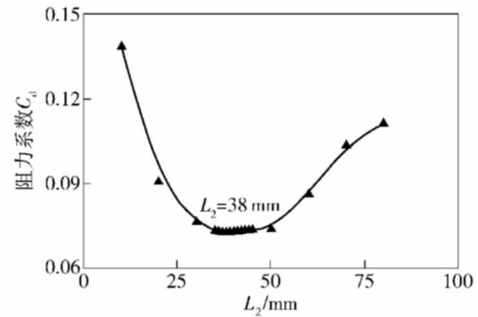
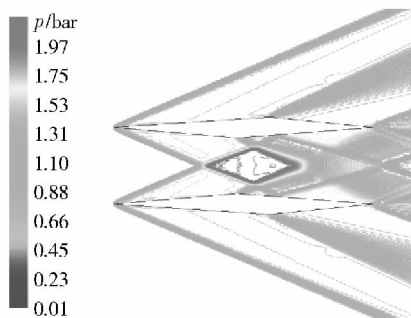
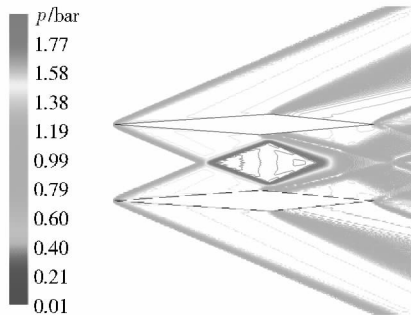


图 6 阻力系数随 L_2 的变化趋势

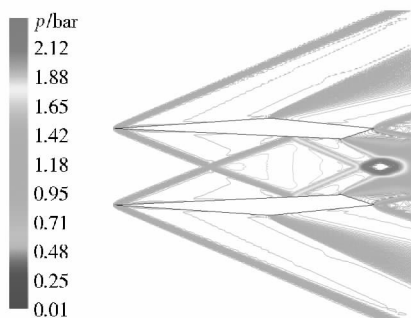
Fig. 6 Drag coefficient vs L_2



(a) $L_2 = 38 \text{ mm}$



(b) $L_2 = 45 \text{ mm}$



(c) $L_2 = 70 \text{ mm}$

图 5 不同 L_2 值时,压力等值线分布

Fig. 5 Distributions of the isobars at $L_2 = 38, 45, 70 \text{ mm}$

对 $L_2 = 10 \text{ mm}, 20 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}, 36 \text{ mm}, 37 \text{ mm}, 38 \text{ mm}, 39 \text{ mm}, 40 \text{ mm}, 41 \text{ mm}, 42 \text{ mm}, 43 \text{ mm}, 44 \text{ mm}, 45 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 60 \text{ mm}, 70 \text{ mm}, 80 \text{ mm}$ 分别进行数值计算,其阻力系数曲线变化如图 6 所示。可

2.3 具有最小阻力系数空心弹模型的分析

根据以上讨论,空心弹由数值计算所确定的具有最小阻力系数的弹型为 $L_1 = 48 \text{ mm}$ 与 $L_2 = 38 \text{ mm}$,其结构形状如图 7 所示。为讨论具有最小阻力系数空心弹的气动特性,现分别对文献 [1] 中的常规空心弹和上述弹型进行数值模拟。

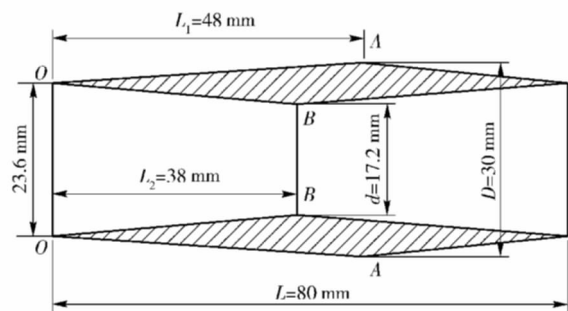


图 7 具有最小阻力系数的空心弹模型

Fig. 7 Hollow projectile with the minimum drag coefficient

图 8 为 Ma 分别为 2.5、3.0 与 4.0 时,本文具有最小阻力系数空心弹与常规弹的压力场对比。可知,虽然两种模型的几何结构不同,但是它们周围流场分布仍然具有很多共同点,弹头部产生斜激波,在壁面的拐点处产生典型 Prandtl-Meyer 膨胀波,其流场分布都关于中心轴对称,且压力最高区域均发生在弹内腔。

但两种模型的压力场差异同样也很明显。弹丸外壁面,因具有最小阻力系数的空心弹夹角比常规弹夹角小,所以其头部斜激波角度要小,且相同马赫数条件下,该弹激波头部厚度也薄,由于此壁面的压力产生阻力,所以该弹外壁面阻力较小。另外,空心弹丸内部由于其头部斜激波碰撞与反射作用,形成

的压力最高区域不同,常规空心弹产生的压力最高区域的大小要小于具有最小阻力系数弹,但其压力值却远高于具有最小阻力系数弹,以 Ma 为 4.0 为例,常规模型压力最高值为 3.81 bar 左右,而具有最

小阻力系数弹压力最高值为 2.51 bar. 这主要由于常规模型内壁结构比具有最小阻力系数弹多一个拐点,导致内腔中的激波的反射和折射的次数会增多,波系结构更加复杂。

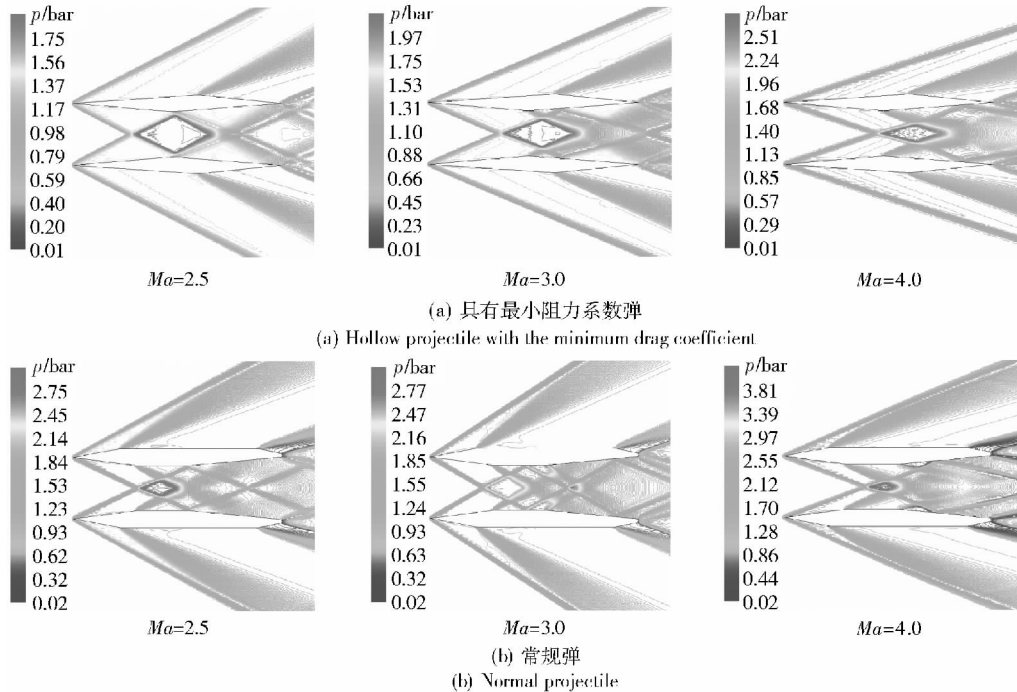


图 8 Ma 分别为 2.5、3.0 与 4.0 时具有最小阻力系数弹模型与常规模型的压力场对比

Fig. 8 Comparison of pressure field of minimum drag coefficient projectile and normal projectile at $Ma = 2.5, 3.0, 4.0$

表 3 Ma 为 3.0 时两种空心弹壁面阻力

Tab. 3 Friction drag forces of both two hollow projectiles at $Ma = 3.0$

弹种	外壁面		内壁面		尾部		弹体		总阻/N
	压阻/N	摩阻/N	压阻/N	摩阻/N	压阻/N	摩阻/N	压阻/N	摩阻/N	
常规弹	14.536	3.897	1.814	4.340	2.559	0	18.909	8.237	27.146
最小阻力系数弹	6.994	3.767	1.616	4.208	0	0	8.610	7.970	16.585

表 3 为 Ma 为 3.0 时,两种弹丸各壁面以及弹丸总阻力值。可知,常规弹的外壁面、内壁面以及尾部(具有最小阻力系数弹无尾部阻力)上的阻力都大于具有最小阻力系数弹,在内壁面上,两种模型相差不大,导致两种模型的阻力相差很大的原因主要在外壁面,这是由于常规弹的弹头部分的压力太大。

为了进一步说明,对两种弹在 Ma 分别 2.5、2.8、3.0、3.3、3.7、4.0 的情况分别进行了数值模拟。图 9 为两种弹的阻力系数与来流马赫数对比曲线与减阻效果图。由图可知:在不同马赫数条件下,本文具有最小阻力系数模型的阻力系数明显低于文献 [1] 中模型的阻力系数,减阻效果大于 30%,这说

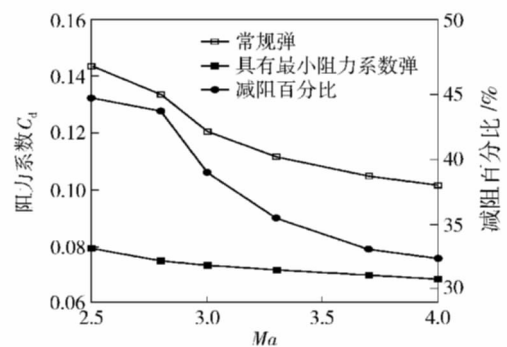


图 9 两种空心弹的阻力系数随来流马赫数变化对比图

Fig. 9 Comparison of drag coefficient of both hollow projectiles at variable Mach numbers

明 本工具具有最小阻力系数弹具有更好的气动减阻特性。

事实上 空心弹的飞行一般都有攻角 我们对此进行了简要研究 发现具有最小阻力系数空心弹的阻力同样随攻角增加而增加 但在相同攻角与马赫数条件下 其值仍比常规空心弹的阻力小。

3 结论

基于阻力系数 利用计算流体力学技术 对空心弹丸的气动外形进行了数值研究 得到了在具有相同内径、外径以及弹丸长度的条件下 阻力系数最小的空心弹几何结构。同时,为了验证数值具有最小阻力系数弹的气动性能 对相同大小的常规弹与本文具有最小阻力系数弹在各种来流条件下进行了数值模拟 分析了其流场压力分布 以及波系结构的特点 得到了本文具有最小阻力系数弹的阻力系数比常规空心弹阻力系数减小 30% 以上。工程实际中,其具体设计与实现方法受工艺等条件的约束 不可能完全与本文具有最小阻力系数弹外形相同 但本文的研究同样可为其提供重要参考。

参考文献(References)

- [1] 王雨时. 西方国家的空心弹技术[J]. 弹箭技术, 1996, 9(3): 1-10.
WANG Yu-shi. Studying progress on hollow projectile technique in the western countries[J]. Projectile & Rocket Technology, 1996, 9(3): 1-10. (in Chinese)
- [2] 任登凤, 谭俊杰, 张军. 非结构隐式方法在空心弹丸流场模拟中的应用[J]. 力学与实践, 2006, 28(5): 24-27.
REN Deng-feng, TAN Jun-jie, ZHANG Jun. Flow field calculation of hollow projectile using implicit method based on unstructured meshes[J]. Mechanics in Engineering, 2006, 28(5): 24-27. (in Chinese)
- [3] 李惠昌, 杨金耀, 祁荣长. 空心弹丸的研究[J]. 兵工学报, 1980, 1(2): 33-41.
LI Hui-chang, YANG Jin-yao, QI Rong-chang. Hollow projectile study[J]. Acta Armamentarii, 1980, 1(2): 33-41. (in Chinese)
- [4] Sadowski L M, Malatesta E T, Huerta J. 30 mm tubular projectile, ADB 087370[R]. US: Army Armament Research and Development Center Dover NJ Fire Control and Small Caliber Weapon Systems Lab, 1984.
- [5] James E Baxter, Cheshire, Robert D. Poole, et al. Tubular projectiles: US, 4882997[P]. 1989-11-28.
- [6] Abraham Flatau, Joseph Huerta. Supersonic, low drag tubular projectile: US, 4301736[P]. 1981-11-24.
- [7] Evans J, Wardlaw A B. Prediction of tubular projective aerodynamics using the ZUES euler code [C] // AIAA, Aerospace Sciences Meeting. Reno, Nevada: ACAA, 1989: 89-0334.
- [8] Lesage F, Raw M J. Computational fluid dynamic applications of a navier-stokes code in external ballistics [C] // AIAA, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: AIAA, 1992: 92-0637.
- [9] 杨金耀. 空心弹风洞实验的侧支杆支承装置[J]. 轻兵器, 1986, 1(3): 37-40.
YANG Jin-yao. Collateral and support device of a hollow projectile in the wind-tunnel experiment[J]. Small Arms, 1986, 1(3): 37-40. (in Chinese)
- [10] 王富耻, 王琳, 李树奎, 等. 空心侵彻弹侵彻金属靶板的细观损伤行为研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(3): 359-362.
WANG Fu-chi, WANG Lin, LI Shu-kui, et al. Micro-damage study of hollow steel projectiles impacting steel plates[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(3): 359-362. (in Chinese)
- [11] 王琳, 王富耻, 王鲁, 等. 贝氏体钢和 35CrMnSi 空心弹体侵彻金属靶板的比较研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 419-423.
WANG Lin, WANG Fu-chi, WANG Lu, et al. Comparative study of penetration performances of steel projectiles impacting stell plates[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(3): 419-423. (in Chinese)
- [12] 高旭东, 钱建平, 王晓鸣, 等. 基于流场数值模拟的空心弹丸阻力特性优化方法[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(4): 161-162.
GAO Xu-dong, QIAN Jian-ping, WANG Xiao-ming, et al. Optimization method for drag characteristic of hollow projectile based on CFD[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(4): 161-162. (in Chinese)
- [13] 陈杨, 廖振强, 王涛, 等. 12.7 mm 口径空心弹丸空气动力学特性分析[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(2): 337-339.
CHEN Yang, LIAO Zhen-qiang, WANG Tao, et al. Research on aerodynamic characteristic of hollow projectile with 12.7 mm diameter[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(2): 337-339. (in Chinese)
- [14] 钱吉胜, 李艳玲, 陈志华, 等. 低阻空心弹流场特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(4): 73-75.
QIAN Ji-sheng, LI Yan-ling, CHEN Zhi-hua, et al. The investigation on flow characteristics of a low-drag hollow projectile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidanc, 2011, 31(4): 73-75. (in Chinese)
- [15] 李艳玲, 陈志华. 口径 30 mm 空心弹真实条件下的气动特性研究[J]. 航空计算技术, 2011, 41(5): 76-80.
LI Yan-ling, CHEN Zhi-hua. Aerodynamic characteristics of hollow projectile with a diameter of 30 mm under real conditions[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(5): 76-80. (in Chinese)
- [16] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 26-28.
HAN Zi-peng. Projectile & rocket exterior ballistics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008: 26-28. (in Chinese)