

武器装备

基于 CFD-CAA 技术某封闭靶场内 噪声特性数值模拟

高盘¹, 胡明^{1*}, 于洋², 段乐乐², 于航鉴¹

(1. 沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159; 2. 北方工程设计研究院有限公司, 石家庄 050011)

摘要: **目的** 预测某封闭靶场排烟室与射击室内的射击噪声特性, 为排烟室降噪与射击孔隔音方案设计提供参考。**方法** 在比测室外射击噪声试验数据, 保证仿真精度的前提下, 采用 CFD-CAA 耦合算法, 对 9 mm 手枪射击时特定封闭靶场内的射击噪声进行数值计算。首先使用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 结合动网格技术, 对封闭靶场内射击时的膛口流场进行数值计算。然后开启 FW-H 声学计算模型, 计算各监测点声学数据。**结果** 封闭靶场内射击时, 排烟室内各监测点噪声声压级较室外射击时均有增强, 增强效果在 20°方位角监测点尤为明显, 最大增强 2.682 dB。**结论** 与室外射击相比, 在封闭靶场内射击时, 排烟室内射击噪声的峰值声压级较大, 混响时间加长, 应针对性选择吸音方案, 降低混响时间。射击室射手人耳处噪声声压级接近安全阈值, 应改进射击孔隔音方案, 降低人耳处直达声。

关键词: 封闭靶场; CAD-CAA; 膛口流场; 射击噪声; 动网格; FW-H; Realizable $k-\varepsilon$;

中图分类号: TJ012.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)12-0085-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.011

Numerical Simulation of Noise Characteristics in a Closed Shooting Range Based on CFD-CAA Technology

GAO Pan¹, HU Ming^{1*}, YU Yang², DUAN Le-le², YU Hang-jian¹

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Norendar International Ltd., Shijiazhuang 050011, China)

ABSTRACT: The work aims to predict the characteristics of the shooting noise in smoke exhaust chamber and shooting room of a closed shooting range to provide reference schemes of noise reduction in the smoke exhaust chamber and sound insulation in the firing hole. In this paper, the CFD-CAA coupling algorithm was used to calculate the shooting noise of a 9 mm pistol in a specific closed shooting range, under the premise that the simulation accuracy was guaranteed by comparing the results of noise test and numerical simulation of outdoor shooting. Firstly, the Realizable $k-\varepsilon$ model and the dynamic grid technique were used to calculate the muzzle flow field in a closed shooting range. Then, the FW-H acoustic calculation model was used to calculate the

收稿日期: 2023-06-20; 修订日期: 2023-08-28

Received: 2023-06-20; Revised: 2023-08-28

基金项目: 辽宁省博士科研启动基金计划项目 (2021-BS-162); 辽宁省教育厅高等院校基本科研项目 (LJKZ0273)

Fund: Doctoral Research Start-up Fund of Liaoning Province (2021-BS-162); Basic Scientific Research Project of Higher Education Institutions of Liaoning Province (LJKZ0273)

引文格式: 高盘, 胡明, 于洋, 等. 基于 CFD-CAA 技术某封闭靶场内噪声特性数值模拟[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 85-94.

GAO Pan, HU Ming, YU Yang, et al. Numerical Simulation of Noise Characteristics in a Closed Shooting Range Based on CFD-CAA Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 85-94.

*通信作者 (Corresponding author)

acoustic data of each monitoring point. Compared with outdoor shooting, the noise pressure level of each monitoring point in the smoke exhaust chamber was enhanced when shooting in the closed shooting range. In particular, the noise pressure level at the 20° azimuth monitoring point was enhanced by 2.682 dB, which was the most obvious. In addition, the sound pressure level of each monitoring point in the shooting room increased with the increase of the azimuth angle. Compared with outdoor shooting, the peak sound pressure level of the shooting noise in the smoke exhaust chamber is higher and the reverberation time is longer, so an effective sound absorption scheme should be adopted to reduce the noise reverberation time. Moreover, the sound pressure level of the shooter's ear noise in the shooting room is close to the safety threshold, so it is necessary to improve the sound insulation scheme of the firing hole to reduce the direct sound at the shooter's ear.

KEY WORDS: closed shooting range; CAD-CAA; muzzle flow field; shooting noise; dynamic grid; FW-H; realizable $k-\varepsilon$

随着射击比赛和警、民用射击训练的需求增加,国内建设了许多现代化封闭靶场。枪械射击产生的持续脉冲噪声不仅会损伤靶场工作人员的听觉安全,还会对靶场周边区域造成声污染^[1-3]。如何降低由射击噪声引起的听力损伤与声污染等问题,逐渐成为封闭靶场设计过程中的重点^[4]。

封闭靶场内的射击噪声主要由2部分组成。一部分是射击时枪械机构运动发生碰撞和摩擦产生的机械噪声;另一部分是弹丸出膛后,弹后高温高压火药燃气膨胀冲击空气而产生的气动噪声,且气动噪声为主要噪声源。因此,靶场噪声防治主要是治理由枪械射击产生的气动噪声^[2]。

在已有的封闭靶场噪声防治研究中,研究人员多通过试验直接测定靶场内所需区域的噪声特性,然后依据测定结果设计噪声防治方案。在国内,项端祈等^[5]通过试验的方法测定了某室内靶场的射击噪声特性,分别针对降低噪声混响时间与靶孔外噪声声压级问题给出了防治方案。褚倩倩等^[6]通过试验的方法探究了隔音技术在靶场噪声治理应用中的可能与难点。在国外,Jokel等^[3]通过试验的方法,直接测定了某室内靶场各区域噪声特性,并针对性给出了不同区域的噪声防治方案与人员防护方案。但在设计阶段,如何预估封闭靶场内噪声情况,并优化封闭靶场结构,仍需要进一步研究封闭靶场内的噪声特性。在国内,王秉义等^[7-10]通过理论结合试验的方法,先研究了膛口噪声的指向性和衰减规律,后从自由场点声源声压级公式出发,建立了描述枪口噪声声压级的预测公式。在国外,William等^[11]通过理论结合试验的方法研究了美国某基地射击场内的噪声特性,发现了标准的Sabine模型和Eyring模型在预测射击噪声混响时间上的局限性,同时提出了新的室内靶场声学模型。

近年来,随着计算机仿真技术的迅速发展,结合气动声学理论,采用计算机数值模拟的方法研究特定结构靶场内噪声特性具备了坚实的理论基础。Bin等^[12]基于数值计算的方法,模拟了国外某7.62 mm口径枪械射击时复杂的膛口流场,最终分析了其射击噪声的产生机理。王杨等^[13]采用CFD-CAA(Computational Fluid Dynamics-Computational Aero-Acoustics)耦合

算法,即采用大涡模拟模型计算了膛口流场,采用FW-H声拟法计算了监测点声学数据,忽略弹丸影响,研究了某7.62 mm口径枪械射击噪声指向性问题。游鹏等^[14]基于CFD-CAA方法,结合试验,考虑弹丸运动对流场的影响,结合动网格技术,数值模拟了某9 mm口径枪械的射击噪声特性。Lo等^[15]基于CFD-CAA方法,在考虑弹丸运动的基础上,研究了带不同结构消音器射击时,射击噪声的降噪效果。随着膛口射流噪声数值模拟研究的逐渐深入,利用数值计算的方法研究特定结构封闭靶场内的噪声特性具备了可行性。

本文基于CFD-CAA耦合算法,使用Realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型,考虑弹丸运动对射击噪声的影响,结合动网格技术,以9 mm手枪为例,对特定封闭靶场射击时膛口流场进行了数值模拟。待膛口流场进入相对稳定阶段后,开启FW-H(Ffows Williams-Hawkings)声学计算模型计算各监测点声学数据。最后,分析排烟室与射击室内的噪声分布与组成特性,并依据分析结果,对排烟室降噪方案与射击孔隔音方案设计提供参考。

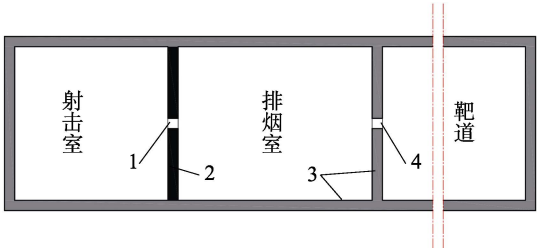
1 数值模拟

封闭靶场噪声仿真计算分为2个阶段。第一阶段是膛口流场计算阶段。封闭靶场内射击,膛口流场包含射击射流、射击孔的孔道内流动和墙壁的边界层流动等复杂流动,选用更具优势的Realizable $k-\varepsilon$ 模型计算近场流。第二阶段是声学计算阶段。封闭靶场内的噪声是燃气射流喷出膛口产生的气动噪声、弹丸超音速飞行产生的激波噪声和墙壁引起的反射噪声综合作用的结果,声源面采集到流场的速度、压力、温度等参数后,选用FW-H声学计算模型计算声源数据,最终得到监测点总声压级。

1.1 几何模型

1.1.1 封闭靶场模型

封闭靶场平面如图1所示。由图1可知,封闭靶场分为射击室、排烟室和靶道3个区域。射击时,射手在射击室通过射击孔将枪口伸入排烟室进行射击。



1-射击孔, 2-200 mm钢筋混凝土墙, 3-240 mm砖墙, 4-过弹孔

图 1 封闭靶场平面示意图

Fig.1 Plane diagram of closed shooting range

射击孔为设有防护隔板的 200 mm×200 mm 方形孔，过弹孔则为 200 mm×200mm 的方形通孔。

本文重点研究射击噪声源所在排烟室与射手所在射击室内的噪声特性。以射击孔为中心，对封闭靶场进行模型分割时，发现排烟室与射击室沿射击方向的纵向尺寸明显大于靶道的横向尺寸。根据噪声叠加原理，排烟室与射击室内的声压级增强效果主要取决于侧面墙壁的噪声反射叠加。为提高排烟室声源处与射击室射手处的网格密度，忽略排烟室远端过弹孔所

在砖墙与射击室远端砖墙对膛口噪声的影响，减小模型沿射击方向的纵向尺寸，以枪膛轴线所在直线为对称轴，建立如图 2 所示的二维轴对称仿真计算模型。

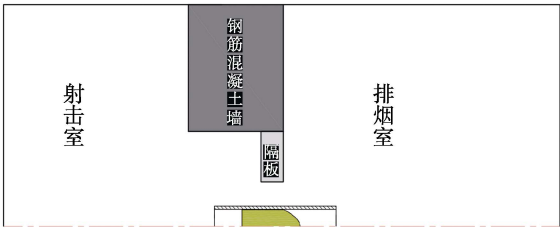


图 2 封闭靶场二维轴对称仿真计算模型

Fig.2 Two-dimensional axisymmetric simulation model for closed shooting range

1.1.2 计算区域与监测点布置

采用两步法进行声学计算，需要设定声源面，用来收集稳定时期膛口流场的压力、速度和温度等相关参数。根据仿真计算模型，划分计算区域（如图 3 所示），相关参数见表 1。

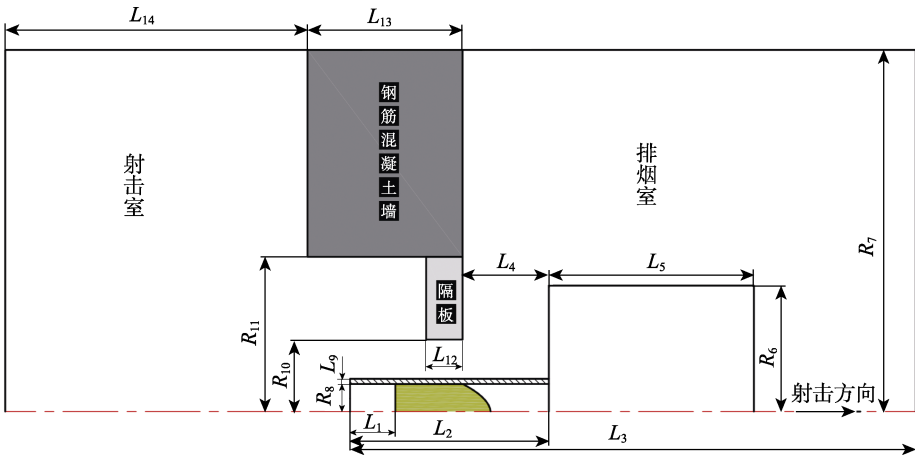


图 3 封闭靶场仿真计算区域模型

Fig.3 Simulation calculation area model for closed shooting range

表 1 数值计算区域模型尺寸			
Tab.1 Numerical calculation of area model dimensions			
参数	数值/ mm	参数	数值/ mm
弹头距膛底距离 L_1	23.7	枪管内膛半径 R_8	4.5
枪管长度 L_2	112	枪管壁厚 L_9	1.75
枪膛及排烟室计算域 长度 L_3	1 612	隔板孔半径 R_{10}	25
枪口伸出壁面距离 L_4	30	射击孔半径 R_{11}	200
声源面长度 L_5	300	隔板厚度 L_{12}	30
声源半径 R_6	180	钢筋混凝土墙 厚度 L_{13}	200
封闭靶场计算域 半径 R_7	1 500	射击室计算域 长度 L_{14}	1 100

使用 Fluent 进行声学计算，需要布置监测点采集声学数据，监测点布置如图 4 所示。在排烟室内，以膛口中心为圆心，布置 $P_1, P_2, \dots, P_9$ 共 9 个监测点；在射击室内，以射击孔中心为圆心，布置 $P'_1, P'_2, \dots, P'_8$ 共 8 个监测点。

1.2 网格划分与边界条件

1.2.1 网格划分

计算模型中包含枪膛、消音室、射击孔通道和射击室 4 个区域，结构复杂。为提高网格质量，采用分块划分的方法，对枪膛、声源面及射击孔通道区域内网格进行加密处理。此外，模型采用动网格技术，为避免网格高度扭曲和出现负体积，网格均选择结构网格，网格划分结果如图 5 所示。总网格数为 417 916，最小网格尺寸位于枪膛内部边界层，为 0.2 mm。

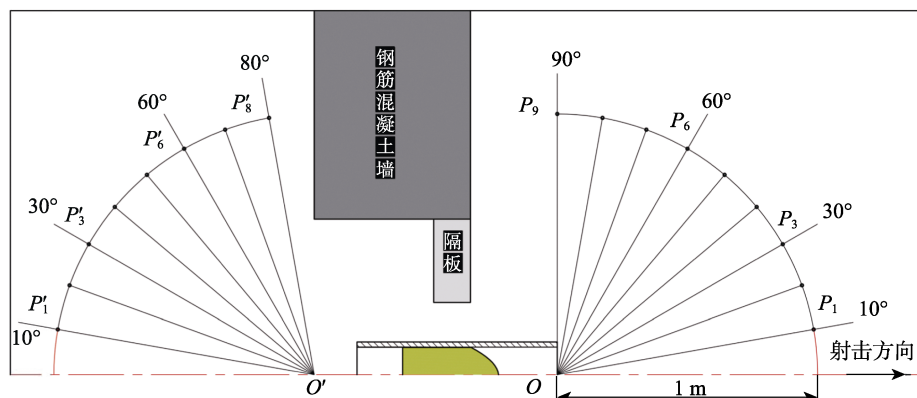
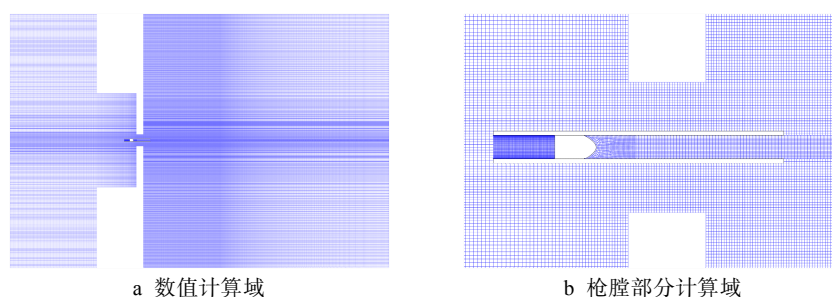


图4 封闭靶场噪声监测点布置

Fig.4 Noise monitoring points in closed shooting range



a 数值计算域

b 枪膛部分计算域

图5 数值计算区域网格划分

Fig.5 Mesh division of numerical calculation domain: a) whole mesh division of numerical calculation; b) mesh division at the the barrel

1.2.2 边界条件

膛口流场是非定常、多相、伴随化学反应的复杂湍流流场,以现有的计算条件无法完全模拟真实的膛口流场。因此,本文工作基于以下假设开展^[16-17]: 1) 将膛内火药燃气流动视为一维准定常等熵流动; 2) 不考虑燃气组分和火药燃气中的化学反应,认为火药气体为可压缩理想气体; 3) 忽略残余火药的影响,以最大膛压点弹丸位置为数值计算的起始位置; 4) 忽略初始阶段膛内火药燃气分布的差异性,认为初始阶段膛内火药燃气均匀分布,以弹底压力近似代表平均压力,火药爆炸温度取平均温度。

基于上述假设,进行内弹道计算,得到9 mm 手枪内弹道阶段 $p-t$ 曲线如图6所示, $v-t$ 曲线如图7所示。

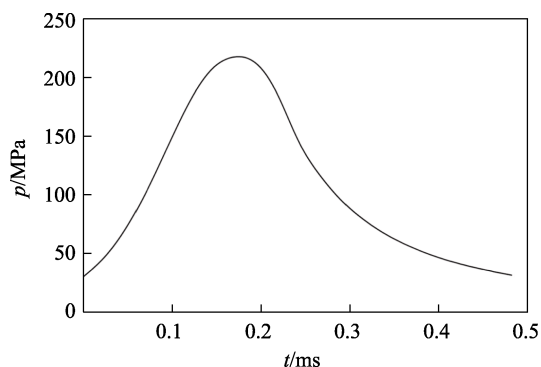


图6 膛内平均压力随时间变化曲线

Fig.6 Change of average pressure in the barrel over time

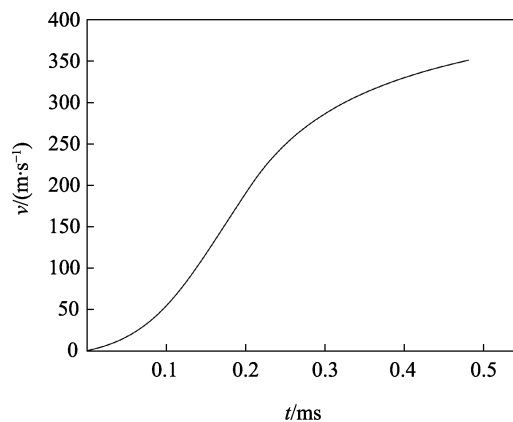


图7 膛内弹丸速度随时间变化曲线

Fig.7 Change of velocity of bullet in the barrel over time

结果显示,内弹道过程中最大膛压为 217.8 MPa,出膛口时弹底压力为 32.1 MPa,弹丸速度为 350.9 m/s。

依据内弹道计算结果,忽略火药燃烧阶段膛内气体的速度、压力和温度的分布差异,认为初始阶段火药燃气是初始速度为 0,且符合 Sutherland 黏度定律的可压缩理想气体;忽略残余火药的影响,以火药气体扩散能力最强的最大膛压点为起始时刻;射击室与排烟室远端边界为非反射压力出口边界;壁面为绝热壁面。仿真结果显示,弹丸出膛口时弹底压力为 30.7 MPa,与内弹道计算结果误差在 5%之内,表明以最大膛压点为仿真计算的初始点是可行的。

1.3 控制方程

使用 CFD-CAA 耦合仿真计算封闭靶场内噪声特性, 需要 2 个控制方程, Realizable k - ε 控制方程与 FW-H 控制方程。

1.3.1 Realizable k - ε 控制方程

Realizable k - ε 模型是 Standard k - ε 模型的改进型, 模型中包含了更多物理机理, 适合更为复杂的流动, 其湍动能 k 和耗散率 ε 的运输方程为:

$$\frac{\rho dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\frac{\rho d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (2)$$

其中:

$$\left\{ \begin{aligned} C_1 &= \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \\ \eta &= \sqrt{2(S_{ij}S_{ij})} \frac{k}{\varepsilon}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \\ \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S U^* k / \varepsilon}, \\ A_S &= \sqrt{6} \cos \varphi, \varphi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6}W), \\ W &= \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\sqrt{S_{ij}S_{ij}}}, U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}, \tilde{\Omega}_{ij} = \\ &\Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: μ 为分子黏性系数; μ_t 为湍流涡黏性系数; ρ 为电解液密度; x_i 、 x_j 为方向向量; u 为流体速度; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为浮力引起的湍动能; Y_M 是可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; σ_k 和 σ_ε 为湍流普朗特数, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.2$; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为常数; ω_k 为角速度; Ω_{ij} 为平均涡度; $\tilde{\Omega}_{ij}$ 为平均旋转速率; $\tilde{\Omega}_{ij}$ 为瞬时旋转速率; C_2 、 A_0 为经验常数; ε_{ijk} 为模型常用的中间变量; S 为时均应变率^[18]。

1.3.2 FW-H 控制方程

FW-H 方程是对通用 Lighthill 声学模型的改进, 可以由连续性方程和动量方程推导:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' &= \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] - \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \} + \\ \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f) \} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: c_0 和 ρ_0 为当地声速与静态流体密度; p' 和

ρ' 为远场声压和密度; T_{ij} 为莱特希尔张量; $H(f)$ 为赫维塞德广义函数; $\delta(f)$ 为狄拉克函数; n_i 为单位外法向量在 x_j 轴方向的分量; u_n 和 v_n 为流体速度和物体运动速度在物体表面单位法向量上的投影^[19-20]。

2 仿真方法

使用 FW-H 声学模型, 需要声源面内的流场处于相对稳定的状态。本文选择膛口射流结构中马赫盘到达膛口最远处的时间点为声学模型的开启点, 以此时刻变流场为初始点, 开始收集时变压力数据。最后, 分析处理数据得到相应的声学数据。因此, 需要单独对封闭靶场射击时的膛口流场进行数值模拟, 确定马赫盘到达膛口最远处的时间点。另外, 结合相关试验结果, 验证本文采用的仿真方法的准确性。

2.1 膛口流场数值模拟

膛口流场发展过程中, 压力与速度的等值线图如图 8 所示。由图 8a 可见, 弹丸加速运动压缩前方空气柱, 弹前空气被挤出形成初始流场。由图 8b 可见, 弹丸出膛口, 高温高压燃气膨胀形成高速射流, 射流与超越弹丸火药燃气相互作用形成冠状激波。由图 8c 可见, 射流与弹丸的持续运动, X 形激波转变为瓶状激波结构。由图 8d 可见, 弹丸继续运动, 火药燃气的压力与速度持续降低, 激波瓶逐渐消失。

某时刻弹后枪膛轴线上的马赫数分布情况如图 9 所示。由图 9 可知, 在距离弹膛底部中心 161.15 mm 时, 马赫盘距离膛口最远, 即选取此位置为声学模型的开启点。

2.2 仿真方法验证

为了验证仿真方法的准确性, 根据已有的膛口射击噪声研究, 同条件下采用两步法对室外射击时的 12 个监测点 (如图 10 所示) 处的射击噪声进行仿真计算, 计算结果如图 11 所示。

本文采用二维轴对称计算模型, 结合图 11 所示计算结果可知, 室外射击时, 射击噪声的大部分声能集中在以枪膛轴线为对称轴的 $\pm 80^\circ$ 方位角内。在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 方位角内, 声压级衰减量几乎为 0; 在 $80^\circ \sim 120^\circ$ 方位角内, 随着测点方位角的增大, 声压级逐渐减小。仿真结果与已有的研究结论吻合较好^[21]。

为进一步验证所采用仿真方法的准确程度, 对仿真结果与试验结果进行比对。由于测点 1 太过接近弹道, 实际测量难度较大, 且无法保证测量精度, 因此忽略测点 1 的结果对比。试验数据来源于文献[14], 对比结果见表 2。

由表 2 可知, 仿真结果与试验结果之间的最大误差约为 8.380%, 表明所建模型是可行且可信的。此外, 在 $50^\circ \sim 120^\circ$ 的大角度监测点上, 仿真结果与试验

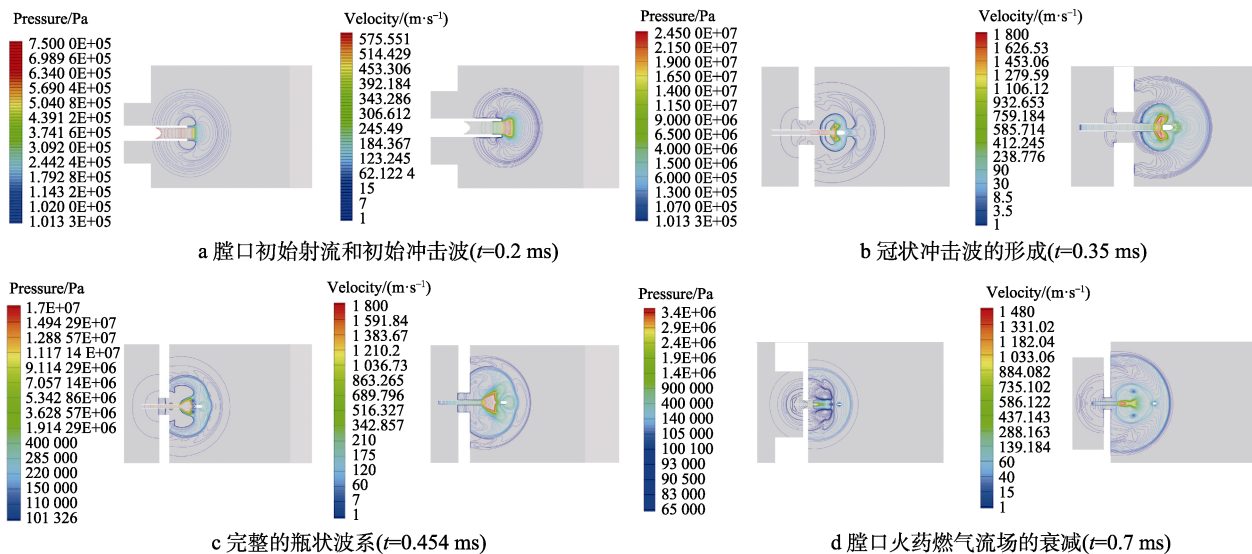


图8 膛口流场发展过程中压力和速度等值线图

Fig.8 Pressure and velocity contours during the development of muzzle flow field: a) initial jet and initial shock wave at the muzzle ($t=0.2$ ms); b) formation of coronary shock wave ($t=0.35$ ms); c) complete bottle-shaped wave system ($t=0.454$ ms); d) attenuation of muzzle gunpowder gas flow field ($t=0.87$ ms)

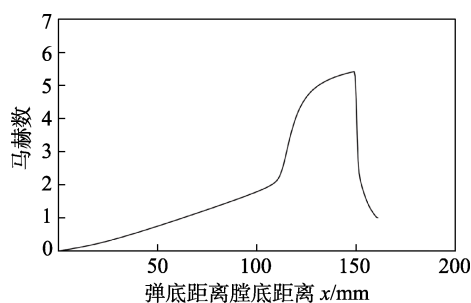


图9 某时刻弹后枪膛轴线上的马赫数分布

Fig.9 Distribution of Mach number on the barrel axis of gun at a certain moment

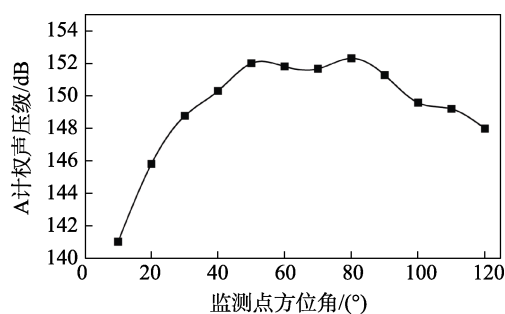


图11 室外射击各监测点射击噪声仿真计算结果

Fig.11 Simulation results of shooting noise at each monitoring point of outdoor shooting

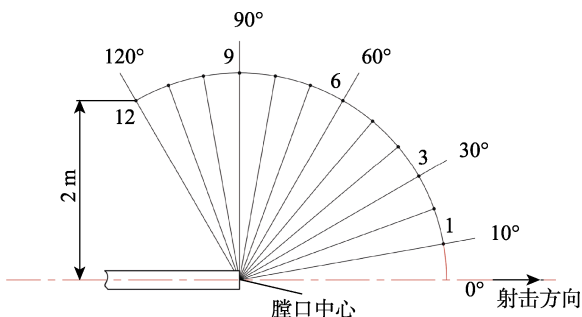


图10 室外射击噪声监测点分布

Fig.10 Distribution of noise monitoring points for outdoor shooting

结果的误差低于 1.308%。与已有的研究相比, 误差明显降低, 表明所建模型在研究大角度方位角噪声特性有一定的优越性。

3 封闭靶场噪声特性分析

3.1 封闭靶场排烟室噪声数值计算结果分析

封闭靶场排烟室数值计算 $10^\circ \sim 90^\circ$ 方位角射击噪

表2 数值计算结果与试验结果对比

Tab.2 Comparison between the calculated and experimental results of OSPL

测点	试验数值/dB	模拟数值/dB	误差/%
2	135.402	145.815	7.690
3	137.285	148.789	8.380
4	144.142	150.330	4.293
5	152.126	152.037	0.059
6	151.918	151.842	0.050
7	152.240	151.702	0.353
8	150.550	152.097	1.028
9	149.351	151.305	1.308
10	149.035	151.305	0.382
11	148.126	149.223	0.741
12	148.296	148.002	0.198

声指向性图如图12所示。由图12可知, 封闭靶场内的射击噪声声能大部分集中在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 。在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 内声压级的变化量几乎为 0; 在 $10^\circ \sim 80^\circ$ 内, 随着方位角的增加, 声压级逐渐增加; 在 $80^\circ \sim 90^\circ$ 内, 随着方

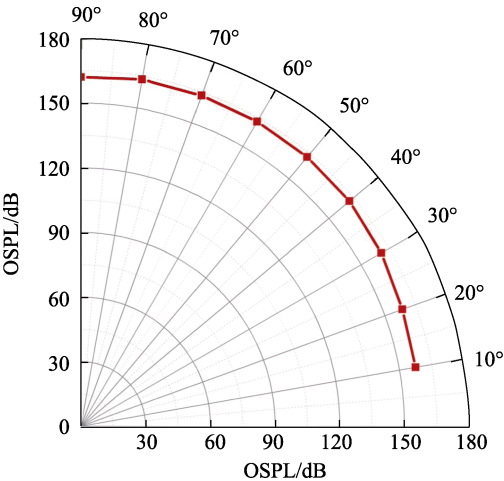


图 12 封闭靶场排烟室数值计算射击噪声指向性图
Fig.12 Numerically calculated firing noise directivity diagram of smoke exhaust chamber in closed shooting range

位角的增加, 声压级逐渐降低。

10°~90°封闭靶场内射击噪声与室外射击噪声数值计算结果见表 3。在封闭靶场内射击时, 在 10°~90°方位角上, 射击噪声皆有增强, 其中在小角度方位角的增强效果明显, 最大增强了 2.682 dB。为了降低排烟室内噪声反射, 地面、墙壁和顶面应采用有效的吸音降噪措施。

封闭靶场排烟室与室外环境监测点射击噪声频谱如图 13 所示。由图 13 可知, 各监测点声源能量都集中在中高频段。封闭靶场射击时, P_1 、 P_2 监测点高

表 3 封闭靶场与室外靶场射击噪声数值计算结果对比
Tab.3 Comparison of numerical calculation results of shooting noise between closed range and outdoor range

测点	室外射击/dB	封闭靶场射击/dB	增强/dB
P_1	155.302	157.428	2.126
P_2	155.652	158.334	2.682
P_3	159.402	160.571	1.169
P_4	161.434	162.277	0.843
P_5	162.571	162.822	0.251
P_6	162.836	163.090	0.254
P_7	163.093	163.176	0.083
P_8	163.046	163.216	0.170
P_9	162.058	162.081	0.023

频段声压级增强效果明显, P_3 、 P_4 监测点高频段声压级增强效果逐渐降低, 在 P_5 ~ P_9 监测点上, 各频段声压级增强微小。

结果表明, 在封闭靶场内射击时, 射击噪声的峰值声压级变化微小, 几乎为 0。但墙壁的反射增强了噪声的混响时间, 加剧了噪声的危害。因此, 排烟室降噪措施的重点是降低室内噪声的反射, 缩短噪声混响时间^[22]。根据依林混响时间计算公式可知, 不考虑吸音材料性能差异的情况下, 排烟室空间体积越小, 噪声的混响时间越短。因此, 设计排烟室装修方案时, 要尽量降低吊顶高度, 降低室内混响时间。

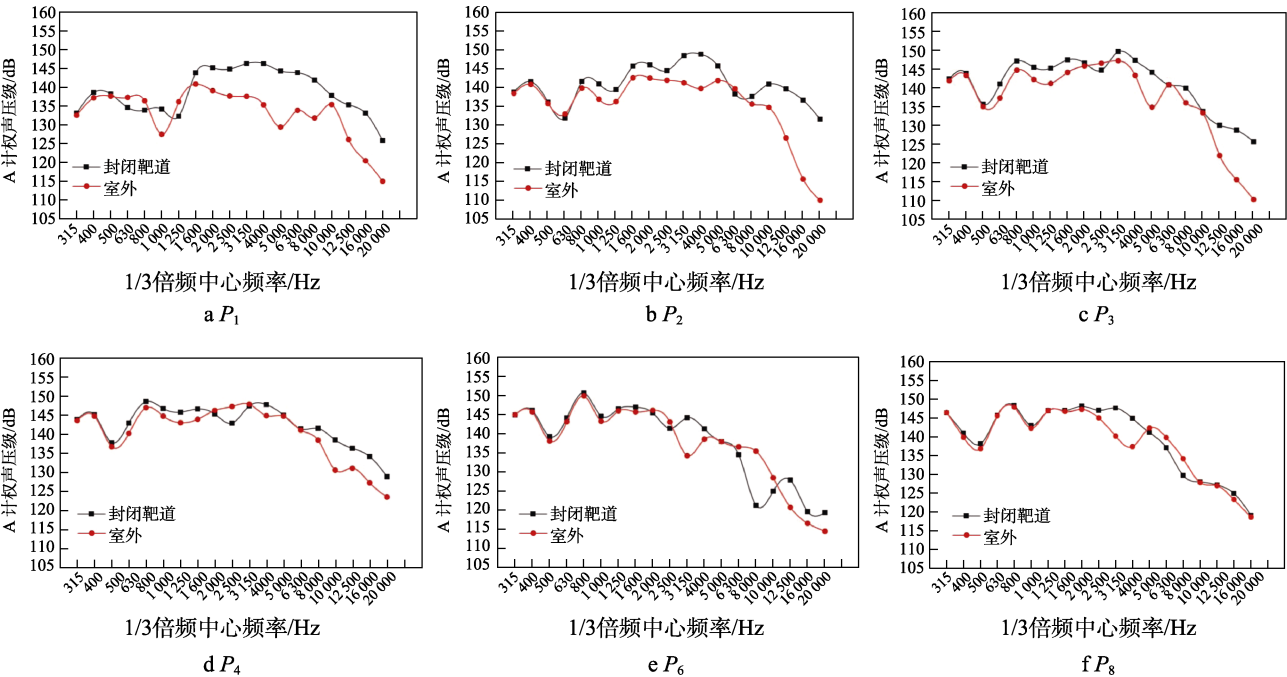


图 13 封闭靶道与室外监测点射击噪声频谱图
Fig.13 Shooting noise spectra of closed target lane and outdoor monitoring points

由文献[23]中的经验公式估算排烟室墙壁隔声量约为 53 dB。 P_8 监测点总声压级为 163.216 dB, 排烟

室外理论声压级约为 110 dB, 远高于 GB 12348—2008^[24]要求。射击噪声为中高频噪声, 为了增强墙壁

的隔音性能,建议采用如图14所示吸音结构。采用双层墙设计,在墙体上借用轻质龙骨构建吸音隔音层,两层墙体间预留30~50 mm的空气层。龙骨通过背衬木块钉装在墙体上,龙骨间隙填充轻质吸音材料,其厚度要大于75 mm,以免发生共振现象,降低中低频噪声的隔音效果^[1]。龙骨与隔音板间垫有一层隔音毡,隔音板表面按要求贴附多孔泡沫铝吸音板。

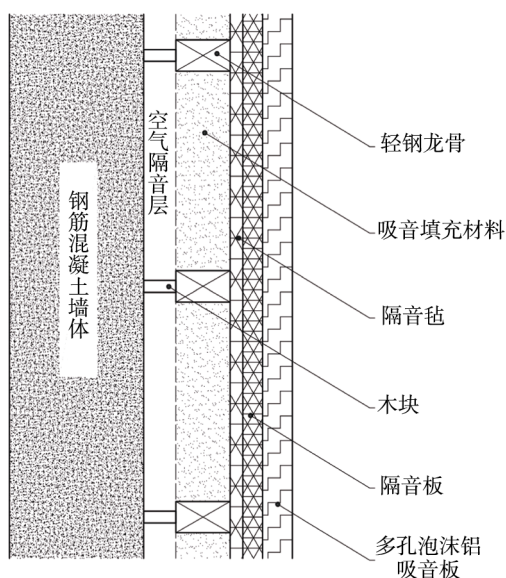


图14 排烟室墙壁吸音结构

Fig.14 Sound absorption structure of smoke exhaust chamber wall

3.2 封闭靶场射击室噪声数值计算结果分析

封闭靶场射击室内数值计算射击噪声总声压级指向性图如图15所示。由图15可知,射击室内射击噪声声压级随着方位角的增加而逐渐增加。在10°~

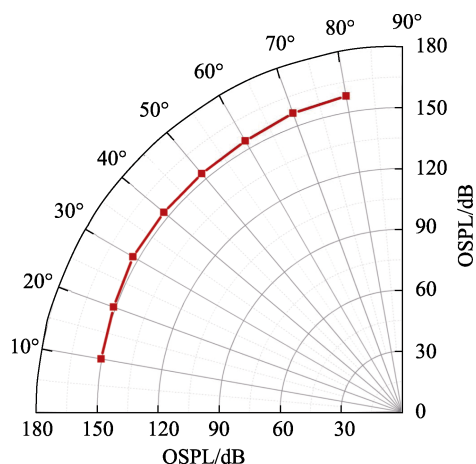


图15 封闭靶场射击室数值计算射击噪声指向性图
Fig.15 Numerically calculated firing noise directivity diagram of shooting chamber in closed shooting range

30°方位角内,射击噪声声压级稳定增加;在30°~40°,噪声增加量几乎为0;在40°~80°,射击噪声声压级迅速增加。其中,在 P_1' 和 P_2' 测点间,声压级变化量最大,声压级增加2.433 dB。

经测量,射击时射手人耳处于枪械后方20°方位角内。根据GJB 2A—1996^[25]查得,连续射击100发时,脉冲噪声对暴露的人耳0°~30°入射的安全阈值约为151.1 dB。仿真结果表明, P_1' 与 P_2' 监测点总声压级分别为150.251、151.031 dB,接近安全阈值,而 P_3' 监测点总声压级为152.798 dB,超出安全阈值。因此,为了保证射手健康,应改进射击孔隔音结构,降低射手处的直达声。

封闭靶场射击室封闭靶场射击室30°方位角内监测点频谱图如图16所示。由图16可知, P_1' 、 P_2' 和 P_3' 监测点频谱图趋势近似相同,且声能集中在中高频段。

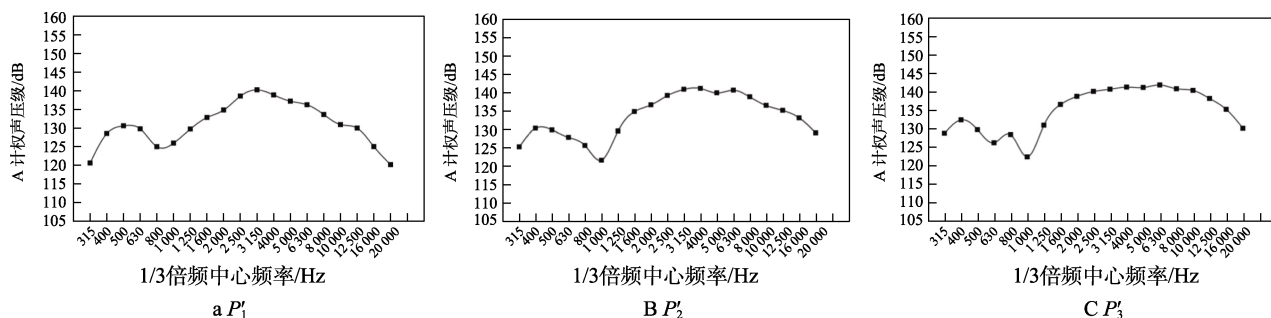


图16 封闭靶场射击室30°方位角内监测点频谱图

Fig.16 Spectrum diagram of monitoring points within 30° azimuth of shooting chamber in closed shooting range

为了保证射击室内射手与其他工作人员的听力健康,需要对现有的射击孔隔板进行改装,改进后的射击孔隔音结构如图17所示。采用双层隔板结构,可以提高对中高频段噪声的隔音效果。射击孔隔音结构分为2个部分,不锈钢隔板提供支撑,玻璃隔板在不影响射手瞄准的情况下封闭射击孔。玻璃隔板分为

上下2块,射击时,玻璃隔板闭合,软质吸音胶圈贴合枪管实现密封。不锈钢隔板与玻璃隔板间加垫一层隔音毡,增强隔音效果。玻璃隔板由支撑体固定连接,支撑体表面贴附一层隔音毡。支撑体两端装有滚轮,配合不锈钢隔板上的轨道,实现玻璃隔板的上下闭合动作。

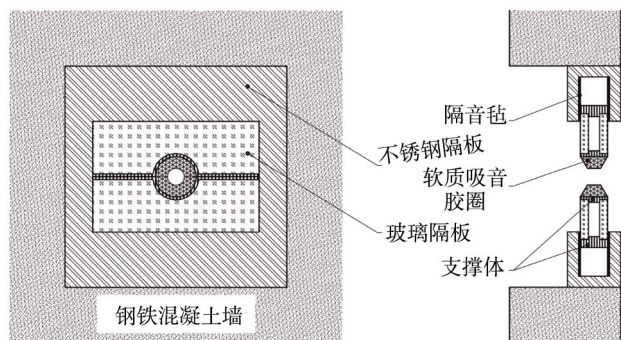


图17 射击孔隔音结构

Fig.17 Sound insulation structure of firing hole

4 结论

本文采用CFD-CAA两步法,结合动网格技术,以9 mm口径枪械为例,分别对室外靶场与封闭靶场射击时的射击噪声进行了数值模拟,得出如下主要结论。

1) 通过对比数值计算与试验结果发现,本文采用的数值计算模型在研究大角度射手方位噪声特性时误差较小,准确性较高。

2) 在封闭靶场进行射击训练时,排烟室内射击噪声较室外靶场射击时皆有增强,在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 方位角上增强明显。

3) 封闭靶场射击时,射击室内射击噪声声压级随着监测点方位角的增加而增加。

4) 由于算例有限,本文皆使用二维模型,排烟室结构未在模型中充分体现,在算力足够的情况下可采用三维模型。

5) 依据仿真结果,参考靶场降噪措施,为本文所研究封闭靶场排烟室降噪方案设计与改进射击孔隔音方案提供参考方向。

参考文献:

- [1] 马大猷, 沈嶸. 声学手册[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2004.
MA D Y, SHEN H. Handbook of Acoustics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 王秉义. 枪炮噪声与爆炸声的特性和防治[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 99-126.
WANG B Y. Gun Muzzle Noise & Explosive Sound—Characteristics, Protection and Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 99-126.
- [3] JOHEL C, YANKASKAS K, ROBINETTE M B. Noise of Military Weapons, Ground Vehicles, Planes and Ships[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 146(5): 3832.
- [4] BARSAN M, BOENIGER M, CROUCH K, et al. Preventing Occupational Exposures to Lead and Noise at Indoor Firing Ranges[R]. [s.l.]: DHHS (NIOSH) Publication, 2009.

- [5] 项端祈, 高鸿印. 室内手枪靶场的噪声控制[J]. 应用声学, 1986, 5(3): 22-29.
XIANG D Q, GAO H Y. Noise Control of Indoor Pistol Shooting Range[J]. Applied Acoustics, 1986, 5(3): 22-29.
- [6] 褚倩倩. 隔声技术在枪械靶场噪声控制中的应用[J]. 噪声与振动控制, 1994, 14(5): 35-37.
CHU Q Q. Application of Sound Insulation Technology in Noise Control of Gun Shooting Range[J]. Noise and Vibration Control, 1994, 14(5): 35-37.
- [7] 王秉义. 膛口噪声特性[J]. 噪声与振动控制, 1983, 3(6): 19-23.
WANG B Y. Muzzle Noise Characteristics[J]. Noise and Vibration Control, 1983, 3(6): 19-23.
- [8] 王秉义. 枪口噪声的声源和物理特性[J]. 兵工学报, 1987, 8(4): 1-9.
WANG B Y. Source of Muzzle Blast Noise and Its Physical Characteristics[J]. Acta Armamentarii, 1987, 8(4): 1-9.
- [9] 王秉义, 康振祯. 枪口周围声压级的预测[J]. 兵工学报, 1991, 12(3): 60-63.
WANG B Y, KANG Z Z. Prediction of Sound Pressure Level around the Muzzle of Small Arms[J]. Acta Armamentarii, 1991, 12(3): 60-63.
- [10] 王秉义, 康振祯. 射击靶场的噪声治理[J]. 噪声与振动控制, 1992, 12(6): 11-13.
WANG B Y, KANG Z Z. Noise Control of Shooting Range[J]. Noise and Vibration Control, 1992, 12(6): 11-13.
- [11] MURPHY W J, XIANG N. Room Acoustic Modeling and Auralization at an Indoor Firing Range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 146(5): 3868.
- [12] BIN J, KIM M, LEE S. A Numerical Study on the Generation of Impulsive Noise by Complex Flows Discharging from a Muzzle[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 75(8): 964-991.
- [13] 王杨, 姜孝海, 杨绪普, 等. 小口径膛口射流噪声的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(4): 508-512.
WANG Y, JIANG X H, YANG X P, et al. Numerical Simulation on Jet Noise Induced by Complex Flows Discharging from Small Caliber Muzzle[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(4): 508-512.
- [14] 游鹏, 周克栋, 赫雷, 等. 含运动弹头的手枪膛口射流噪声场特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(12): 2597-2605.
YOU P, ZHOU K D, HE L, et al. Characteristics of Muzzle Jet Noise Field Including Moving Bullet of a Pistol[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(12): 2597-2605.
- [15] LO S W, TAI C H, TENG J T. Axial-Symmetry Numerical Approaches for Noise Predicting and Attenuating of Rifle Shooting with Suppressors[J]. Journal of Applied Mathematics, 2011, 2011: 961457.
- [16] 廖振强, 邱明. 自动武器气体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
LIAO Z Q, QIU M. Gas Dynamics of Automatic Weapons[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [17] 李鸿志, 姜孝海, 王杨, 等. 中间弹道学[M]. 北京: 北

- 京理工大学出版社, 2015.
- LI H Z, JIANG X H, WANG Y, et al. Intermediate Ballistics[M]. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 2015.
- [18] 胡仁喜, 康士廷. FLUENT 19.0 流场分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 257-260.
- HU R X, KANG S T. FLUENT 19.0 Flow Field Analysis from Introduction to Proficiency[M]. Beijing: China Machine Press, 2020: 257-260.
- [19] FLOWCS WILLIAMS J E, HAWKINGS D L. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1969, 264(1151): 321-342.
- [20] 程建春. 声学原理-上卷[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2019: 982-107.
- CHENG J C. Principles of Acoustics-Volume I[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2019: 982-107.
- [21] 赵欣怡, 周克栋, 赫雷, 等. 某大口径轻武器射流噪声的小波分析与数值模拟[J]. 兵工学报, 2019, 40(11): 2195-2203.
- ZHAO X Y, ZHOU K D, HE L, et al. Wavelet Analysis and Numerical Simulation of Jet Noise Induced by a Large Caliber Small Arms[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(11): 2195-2203.
- [22] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 258-263.
- MA D Y. Theoretical Basis of Modern Acoustics[M]. Beijing: Science Press, 2004: 258-263.
- [23] 康玉成. 建筑隔声设计——空气声隔声技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- KANG Y C. Building Sound Insulation Design — Air Sound Insulation Technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [24] GB 12348—200, 工业企业厂界环境噪声排放标准[S]. GB 12348—2008, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Emission Standard for Industrial Enterprises Noise at Boundary[S].
- [25] GJB 2A—1996, 常规兵器发射或爆炸时脉冲噪声和冲击波对人员听觉器官损伤的安全限值[S]. GJB 2A—1996, Safety Limits of Impulse Noise and Shock Wave Damage to Human Hearing Organs during Launch or Explosion of Conventional Weapons[S].
- 责任编辑: 刘世忠